



Alex Mesquita

Licenciado em Ciências de Engenharia

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Ramo de estruturas

Orientador: Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de
Almeida

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu

Arguente: Prof. Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos

Vogal: Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Maio 2013



Alex Mesquita

Licenciado em Ciências de Engenharia

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Ramo de estruturas

Orientador: Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de
Almeida



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Maio 2013

“Copyright” Alex Mesquita, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Queria agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida, pelos seus conselhos, disponibilidade e conhecimentos transmitidos ao longo desta dissertação.

Queria também agradecer à minha família, pelo apoio constante, não só durante a elaboração da dissertação como ao longo de todo o meu percurso académico, em particular aos meus pais que possibilitaram e incentivaram a minha formação.

Aos meus amigos, por tudo o que fizeram por mim até hoje e aos meus colegas de curso, pelas experiências e conhecimentos partilhados ao longo deste percurso.

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo a análise e dimensionamento de estruturas de aço ao fogo segundo o Eurocódigo 3, dando maior ênfase à parte 1-2 que diz respeito a estruturas de aço em situação de incêndio.

As estruturas de aço são amplamente utilizadas na construção de edifícios devido à sua elevada resistência mecânica, boa ductilidade e rápida execução da obra. No entanto, devido à deterioração das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura, é fundamental que toda a estrutura, e os seus elementos, possuam a resistência necessária para prevenir um eventual colapso causado pela ocorrência de um incêndio, limitando assim, todos os riscos que possam advir desta situação.

Palavras chave:

Análise estrutural; Dimensionamento; Estruturas de aço; Fogo; Eurocódigo 3;

Abstract

The purpose of this thesis is the structural analysis and design of steel structures when subject to fire conditions, using information proposed by Eurocode 3.

Steel structures are widely used in construction nowadays thanks to their high mechanical resistance, good ductility and fast execution. Meanwhile, with the deterioration of the mechanical properties due to the rise of temperatures, it is fundamental that the structure ensures the resistance necessary to prevent any collapse caused by a fire, limiting the risks that might arise from this situation.

Keywords:

Structural analysis; Design; Steel structures; Fire; Eurocode 3;

Índice de Matérias

Índice de Matérias	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Quadros	xv
Índice de Tabelas	xvii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização.....	3
2 Propriedades dos aço	5
2.1 Propriedades mecânicas do aço.....	5
2.2 Propriedades térmicas.....	9
2.2.1 Dilatação térmica.....	9
2.2.2 Calor específico.....	11
2.2.3 Condutibilidade térmica.....	12
3 Ações em estruturas em situação de incêndio	15
3.1 Ações mecânicas.....	15
3.2 Ações térmicas.....	18
3.2.1 Processos de transmissão de calor.....	18
3.2.2 Incêndio natural.....	19
3.2.3 Curvas de incêndio nominais.....	20
3.2.4 Curvas de incêndio paramétricas.....	22

4	Evolução da temperatura no elemento	29
4.1	Fator de massividade ou fator de forma.....	29
4.2	Elementos não protegidos.....	35
4.3	Elementos protegidos.....	36
5	Materiais e sistemas de proteção ao fogo	39
5.1	Materiais de proteção.....	39
5.1.1	Betão	41
5.1.2	Gesso	41
5.1.3	Vermiculite	41
5.1.4	Fibras minerais	42
5.1.5	Argila expandida e betões leves	42
5.1.6	Tintas intumescentes	42
5.2	Sistemas de proteção.....	43
5.2.1	Proteção por envolvimento total.....	44
5.2.2	Proteção por resguardos ou ecrãs.....	44
5.2.3	Proteção por material projetado ou tintas intumescentes.....	44
5.2.4	Proteção por caixão.....	44
5.2.5	Proteção por circulação de água.....	44
5.2.6	Arrefecimento por instalação de sprinklers.....	45
6	Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo	47
6.1	Classificação das secções.....	50
6.1.1	À temperatura ambiente.....	50
6.1.2	A temperatura elevada.....	52
6.2	Elementos tracionados.....	53
6.3	Elementos comprimidos com secções transversais da Classe 1, 2 ou 3.....	54
6.4	Vigas com secções transversais da Classe 1 ou da Classe 2.....	56
6.5	Vigas com secções transversais da Classe 3.....	60
6.6	Elementos com secções transversais das Classes 1, 2 ou 3, sujeitos a flexão composta com compressão.....	61
6.7	Temperatura crítica.....	64
6.8	Tempo equivalente de exposição ao fogo.....	67

7	Exemplo prático	71
7.1	Elemento de contraventamento (Sujeito a tração).....	74
7.1.1	No domínio da resistência estrutural.....	74
7.1.2	No domínio temporal.....	75
7.1.3	No domínio da temperatura.....	76
7.2	Viga (Sujeita a flexão composta com compressão).....	76
7.2.1	No domínio da temperatura.....	82
7.2.2	No domínio temporal.....	82
7.2.3	No domínio da resistência estrutural.....	83
7.3	Pilares (Sujeitos a compressão).....	85
7.3.1	No domínio da temperatura.....	88
7.3.2	No domínio temporal.....	88
7.3.3	No domínio da resistência estrutural.....	88
7.4	Utilização de material de proteção.....	90
7.5	Esforços atuantes.....	91
7.5.1	Combinação accidental	92
7.5.2	Método simplificado (Hipótese 1).....	92
7.5.3	Método simplificado (Hipótese 2).....	93
8	Conclusões	95
	Bibliografia	97

Índice de Figuras

Figura 1.1: Torre Windsor (Madrid).....	2
Figura 1.2: World Trade Center (Nova Iorque).....	2
Figura 2.1: Relação tensões – extensões para aços carbono a elevadas temperaturas.....	6
Figura 2.2: Variação dos fatores de redução com a temperatura.....	9
Figura 2.3: Variação da extensão térmica com a temperatura.....	10
Figura 2.4: Variação do calor específico com a temperatura.....	12
Figura 2.5: Variação da condutibilidade térmica com a temperatura.....	13
Figura 3.1: Modelo de incêndio natural.....	20
Figura 3.2: Desenvolvimento das curvas nominais.....	21
Figura 3.3: Desenvolvimento de curvas paramétricas.....	28
Figura 5.1: Exemplos de envolvimento com betão.....	41
Figura 5.2: Isolamento em vermiculite.....	42
Figura 5.3: Tinta intumescente.....	43
Figura 6.1: Tempo equivalente de exposição ao fogo.....	48
Figura 6.2: Comprimentos de encurvadura de colunas em pórticos contraventados.....	56
Figura 6.3: Variação da temperatura crítica com o grau de utilização.....	66
Figura 7.1: Pórtico contraventado.....	71
Figura 7.2: Diagrama do esforço axial para sobrecarga como ação variável base.....	72
Figura 7.3: Diagrama do esforço transversal para sobrecarga como ação variável base.....	72
Figura 7.4: Diagrama do momento fletor para sobrecarga como ação variável base.....	73
Figura 7.5: Diagrama do esforço axial para vento como ação variável base.....	73
Figura 7.6: Diagrama do esforço transversal para vento como ação variável base.....	74
Figura 7.7: Diagrama do momento fletor para vento como ação variável base.....	74

Índice de Quadros

Quadro 2.1: Fatores de redução para a relação tensões – extensões do aço a temperaturas elevadas	8
Quadro 3.1: Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios.....	17
Quadro 4.1: Fator de massividade A_m/V para elementos de aço não protegidos.....	31
Quadro 4.2: Fator de massividade A_p/V para elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio.....	33
Quadro 6.1: Relações Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (almas).....	51
Quadro 6.2: Relações Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (consolas).....	52
Quadro 6.3: Coeficientes de momento uniforme equivalente β_M	56

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Duração mínima da fase de aquecimento t_{lim}	23
Tabela 3.2: Tipo de ocupação.....	23
Tabela 3.3: Fator parcial δ_{q1} que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento.....	25
Tabela 3.4: Fator parcial δ_{q2} que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação.....	25
Tabela 3.5: Fator parcial δ_{qn} que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio.....	26
Tabela 3.6: Valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento.....	26
Tabela 4.1: Temperatura em secções não protegidas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834.....	34
Tabela 4.2: Temperatura em secções protegidas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834.....	38
Tabela 5.1: Propriedades de materiais mais comuns utilizados como proteção contra o fogo...	40
Tabela 6.1: Fator de correção em função do material.....	68
Tabela 6.2: Fator de conversão.....	68
Tabela 7.1: Processo iterativo para obtenção da temperatura crítica.....	87
Tabela 7.2: Processo iterativo para obtenção da temperatura crítica.....	91
Tabela 7.3: Esforços obtidos pela combinação acidental (sobrecarga dominante).....	92
Tabela 7.4: Esforços obtidos pela combinação acidental (vento dominante).....	92
Tabela 7.5: Esforços obtidos pelo método simplificado (sobrecarga dominante).....	93
Tabela 7.6: Esforços obtidos pelo método simplificado (vento dominante).....	93
Tabela 7.7: Esforços obtidos pelo valor recomendado (sobrecarga dominante).....	93
Tabela 7.8: Esforços obtidos pelo valor recomendado (vento dominante).....	94

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

EC1 Eurocódigo 1

EC3 Eurocódigo 3

Siglas

UNL Universidade Nova de Lisboa

FCT Faculdade de Ciências e Tecnologia

Simbologia

A área do compartimento de incêndio

A_d valor de cálculo da ação de acidente

A_f área do pavimento do compartimento de incêndio

A_h área das aberturas horizontais no teto do compartimento de incêndio

A_m/V fator de forma da secção transversal do perfil não protegido

A_m área da superfície de um elemento diretamente aquecida pelo fogo

A_p área da superfície interior da proteção, correspondente à superfície de exposição ao incêndio por unidade de comprimento

A_p/V fator de forma da secção transversal do perfil protegido

A_t área total da superfície envolvente

A_v área total das aberturas verticais em todas as paredes

E_a módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente

$E_{a,\theta}$ módulo de elasticidade do aço à temperatura elevada, θ_a

E_d	valor de cálculo dos efeitos das ações à temperatura ambiente
$E_{fi,d}$	valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio
G_k	valor característico da ação permanente
L	comprimento
$M_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio
$M_{fi,t,Rd}$	valor de cálculo do momento resistente à em situação de incêndio
$N_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo do esforço de compressão resistente em situação de incêndio
$N_{fi,t,Rd}$	valor de cálculo do esforço de tração resistente em situação de incêndio
O	fator de abertura
O_{lim}	fator de abertura reduzido em caso de incêndio controlado pela carga de incêndio
$Q_{k,1}$	valor característico da ação variável principal
$Q_{k,i}$	valor característico das outras ações variáveis
$R_{fi,d,t}$	valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t
V	volume por unidade de comprimento
b	inércia térmica da parede envolvente
c_a	calor específico do aço
c_p	calor específico do material de proteção
d_p	espessura do material de proteção
$f_{p,\theta}$	tensão limite de proporcionalidade do aço à temperatura elevada, θ_a
f_y	tensão de cedência efetiva do aço à temperatura ambiente
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência efetiva do aço à temperatura elevada, θ_a
h_{eq}	média pesada da altura das aberturas verticais em todas as paredes
$\dot{h}_{net,d}$	valor de cálculo do fluxo de calor por unidade de área
$\dot{h}_{net,c}$	valor de cálculo do fluxo de calor por convecção por unidade de área
$\dot{h}_{net,r}$	valor de cálculo do fluxo de calor por radiação por unidade de área
i	raio de giração do perfil
κ_1	fator de adaptação para a temperatura não uniforme na secção transversal
κ_2	fator de adaptação para a temperatura não uniforme ao longo da viga
k_{sh}	factor de correção para o efeito de sombra
l	comprimento de encurvadura a 20 °C
l_{fi}	comprimento de encurvadura em situação de incêndio
m	fator de combustão

p	valor do teor de humidade do material de proteção contra incêndio
$q_{f,d}$	valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento
$q_{f,k}$	valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento
$q_{t,d}$	valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área da superfície envolvente
t	tempo de exposição ao fogo
$t_{fi,d}$	valor de cálculo da resistência ao fogo com base no incêndio padrão ISO 834
$t_{fi,requ}$	resistência ao fogo exigida regulamentarmente com base no incêndio padrão ISO 834
t_{lim}	tempo correspondente à temperatura máxima no compartimento de incêndio no caso do incêndio ser controlado pela carga de incêndio
t_{max}	tempo correspondente à temperatura máxima no compartimento de incêndio
t_v	tempo de atraso devido ao teor de humidade existente no material de proteção ao fogo
Δl	alongamento induzido pela temperatura
$\Delta l/l$	extensão devido à variação da temperatura
Δt	intervalo de tempo
$\Delta \theta_{a,t}$	variação da temperatura de um perfil metálico durante o intervalo de tempo Δt
$\Delta \theta_{g,t}$	variação da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δt
ϕ	fator de configuração
Γ	fator tempo, função do fator de abertura O e da inércia térmica b
Γ_{lim}	fator tempo, função do fator de abertura O_{lim} e da inércia térmica b
α_c	coeficiente de transferência de calor por convecção
α_h	área das aberturas horizontais no teto por unidade de área do pavimento
α_r	coeficiente de transferência de calor por radiação
α_v	área das aberturas verticais na fachada por unidade de área do pavimento
$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$	fator parcial que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio
δ_{q1}	fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento
δ_{q2}	parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação
ε_f	emissividade das chamas

ε_m	emissividade relacionada com a superfície do material do elemento
$\varepsilon_{p,\theta}$	extensão limite de proporcionalidade à temperatura θ
$\varepsilon_{u,\theta}$	extensão última à temperatura θ
$\varepsilon_{y,\theta}$	extensão de cedência à temperatura θ
\emptyset	quantidade de calor armazenada na proteção
γ_G	coeficiente parcial de segurança da ação permanente à temperatura ambiente ($\gamma_G = 1,35$)
$\gamma_{M,0}$	fator parcial de segurança da resistência das secções transversais ($\gamma_{M,0} = 1,0$)
$\gamma_{M,fi}$	fator parcial de segurança para o material em situação de incêndio ($\gamma_{M,fi} = 1,0$)
$\gamma_{Q,1}$	coeficiente parcial de segurança da ação variável principal à temperatura ambiente ($\gamma_{Q,1} = 1,5$)
η_{fi}	fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio
λ_p	condutibilidade termica do sistema de proteção contra incêndio
$\bar{\lambda}$	esbelteza adimensional
$\bar{\lambda}_\theta$	esbelteza adimensional à temperatura θ
μ_0	grau de utilização no instante $t = 0$
$\theta_{cr,d}$	valor de cálculo da temperatura crítica
θ_d	valor de cálculo da temperatura do aço
θ_g	temperatura do compartimento de incêndio
θ_m	temperatura da superfície do elemento
θ_r	temperatura de radiação na vizinhança do perfil
ρ_a	massa especifica do aço
ρ_p	massa especifica do material de proteção contra incêndio
$\psi_{1,1}$	coeficiente de combinação associado à ação principal
$\psi_{2,i}$	coeficiente de combinação associado às restantes ações variáveis

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

O aço é um material que tem vindo a ganhar um grande destaque na construção, por apresentar várias vantagens em relação a outros materiais. Em relação ao betão armado, que representa grande parte das estruturas existentes, o aço apresenta vantagens tais como melhor relação resistência/peso, melhor resistência aos sismos devido à sua maior ductibilidade e menor peso, uma construção mais rápida e mais precisa, ser um material quase cem por cento reciclável, ter fundações mais económicas devido ao seu menor peso e permitir vencer maiores vãos. Porém, a utilização do aço não traz só vantagens. Uma desvantagem do aço em relação a outros materiais, é apresentar uma elevada condutividade térmica, afetando assim, as suas propriedades resistentes com o aumento da temperatura. Por esta razão, e devido ao aumento da utilização deste material, tem havido um maior foco sobre a análise e dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio.

O fogo é um dos fenómenos naturais mais temíveis em estruturas e se não for estudado corretamente, as consequências podem ser devastadoras.

A figura 1.1 retrata a Torre Windsor em Madrid após o incêndio que deflagrou no ano 2005. A torre estava a ser sujeita a obras de remodelação (incluindo instalação de sistemas de proteção ao fogo) quando deflagrou o incêndio. Nesta altura todos os andares inferiores ao 17º (excluindo o 9º e o 15º andar) já possuíam sistemas de proteção ao fogo acabando por resistir ao fogo, ao contrário dos andares superiores ao 17º que acabaram por colapsar.

A figura 1.2 retrata o incêndio que deflagrou após o embate dos aviões nas torres do World Trade Center em Nova Iorque. O embate provocou a destruição de vários elementos estruturais,

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Introdução

e conjugado com a temperatura a que os elementos estruturais estavam sujeitos devido ao fogo causado pelo combustível dos aviões, as torres acabaram por colapsar.



Figura 1: Torre Windsor (Madrid)



Figura 2: World Trade Center (Nova Iorque)

Com uma melhor compreensão do comportamento do fogo e do seu impacto em estruturas de aço é possível desenvolver métodos e técnicas de dimensionamento e construção de forma a tornar estas estruturas mais seguras e económicas.

Para esse efeito, foi criada a Norma Europeia EN 1991-1-2, que fornece orientações relativas às acções térmicas e mecânicas sobre estruturas expostas ao fogo, e a Norma Europeia EN 1993-1-2 que trata do projeto de estruturas de aço em situação accidental de exposição ao fogo.

O objetivo de tornar uma estrutura resistente ao fogo é de prevenir a perda de vidas, diminuir os riscos para a sociedade e para os bens vizinhos e salvar os bens diretamente expostos ao incêndio. Para tal a capacidade resistente de uma estrutura tem que ser garantida durante um período de tempo pré-determinado (EF XX), representando a sigla EF Estabilidade ao Fogo e XX o escalão de tempo (em minutos) para o qual a estabilidade tem de ser garantida. O escalão de tempo depende do tipo de edifício e da altura desta, podendo depois ser consultada o seu respetivo valor nos regulamentos nacionais de segurança contra incêndios em edifícios.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é a análise e dimensionamento de estruturas de aço ao fogo utilizando as equações prescritas no Eurocódigo 3, parte 1.2.

São também utilizadas as equações prescritas no Eurocódigo 1, parte 1.2 que definem as curvas de incêndio às quais os elementos estruturais estarão sujeitos.

1.3 Organização

A presente dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos:

- No segundo capítulo são abordadas as propriedades térmicas e mecânicas do aço e como a variação da temperatura influencia estas;
- No terceiro capítulo são analisadas as ações térmicas e mecânicas às quais uma estrutura é sujeita em situação de incêndio;
- No quarto capítulo faz-se referência ao à evolução da temperatura em secções para perfis protegidos e não protegidos;
- No quinto capítulo são identificados vários tipos de materiais para proteger os elementos do fogo e também vários sistemas de proteção;
- No sexto capítulo é feita uma verificação da segurança;
- No sétimo capítulo tem-se um exemplo de aplicação;
- No oitavo e último capítulo apresentam-se as conclusões retiradas do trabalho efectuado.

Capítulo 2

Propriedades do aço

O aumento da temperatura afeta substancialmente as propriedades térmicas e mecânicas do aço, influenciando assim, os resultados obtidos no dimensionamento de uma estrutura. Estas propriedades são calculadas em função da temperatura e são descritas na parte 1.2 do Eurocódigo 3 sendo aqui ilustradas de seguida [3].

2.1 Propriedades mecânicas do aço

A exposição do aço a altas temperaturas diminui as suas características físicas e químicas, o que causa a redução de rigidez e de resistência.

A figura 2.1 mostra a relação tensões – extensões para aços carbono a elevadas temperaturas

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Propriedades do aço

Domínio de extensões	Tensão σ	Módulo tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

Tensão σ

$\varepsilon_{p,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta}$ $\varepsilon_{t,\theta}$ $\varepsilon_{u,\theta}$ Extensão ε

$E_{a,\theta} = \text{tg } \alpha$

Legenda:

$f_{y,\theta}$ tensão de cedência efectiva;

$f_{p,\theta}$ tensão limite de proporcionalidade;

$E_{a,\theta}$ inclinação da recta que representa o domínio elástico;

$\varepsilon_{p,\theta}$ extensão limite de proporcionalidade;

$\varepsilon_{y,\theta}$ extensão de cedência;

$\varepsilon_{t,\theta}$ extensão limite para o patamar de cedência;

$\varepsilon_{u,\theta}$ extensão última.

Figura 2.1: Relação tensões – extensões para aços carbono a elevadas temperaturas [3]

O quadro 2.1 indica os fatores de redução para a relação tensões – extensões do aço a temperaturas elevadas representada na figura 2.1. Estes fatores de redução são definidos da seguinte forma:

- Tensão de cedência efetiva, referida à tensão de cedência a 20 °C:

$$K_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y \quad (2.1)$$

- Tensão limite de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20 °C:

$$K_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y \quad (2.2)$$

- Inclinação da reta que representa o domínio elástico, referida à inclinação a 20 °C:

$$K_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a \quad (2.3)$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Propriedades do aço

Quadro 2.1: Fatores de redução para a relação tensões – extensões do aço a temperaturas elevadas [3]

Temperatura do aço θ_a	Factores de redução à temperatura θ_a referidos ao valor de f_y ou E_a a 20 °C		
	Factor de redução (referido a f_y) para a tensão de cedência efectiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Factor de redução (referido a f_y) para a tensão limite de proporcionalidade $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Factor de redução (referido a E_a) para a inclinação da recta que representa o domínio elástico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000
<i>NOTA: Para os valores intermédios da temperatura do aço, poderá efectuar-se uma interpolação linear.</i>			

A variação destes fatores de redução com a temperatura é representada na figura 2.2.

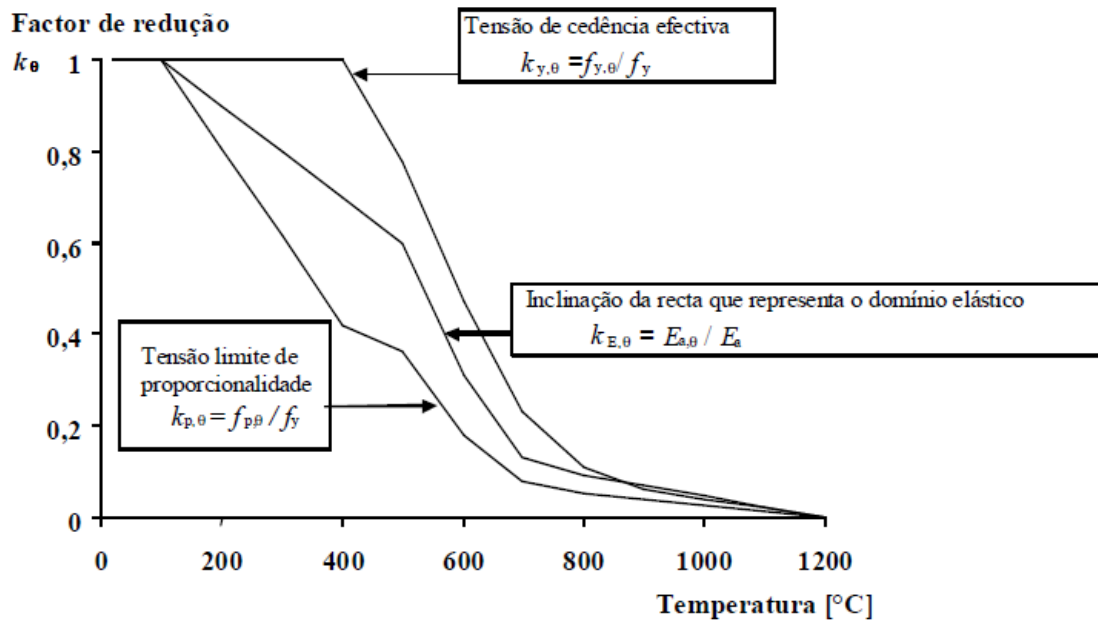


Figura 2.2: Variação dos fatores de redução com a temperatura [3]

Quanto à massa específica do aço ρ_a , pode-se considerar independente da sua temperatura. Sendo assim pode-se considerar o seguinte valor: $\rho_a = 7850 \text{ Kg/m}^3$. [3]

2.2 Propriedades térmicas

2.2.1 Dilatação térmica

Um elemento estrutural de aço quando é aquecido sofre uma dilatação térmica, relacionada com a variação da deformação térmica com a temperatura. A razão entre a deformação térmica e a temperatura denomina-se de coeficiente de dilatação térmica. [11]

A dilatação térmica do aço varia com o aumento da temperatura e pode ser determinada da seguinte forma [3]

- Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \cdot \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \cdot \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (2.4)$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Propriedades do aço

- Para $750\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 860\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (2.5)$$

- Para $750\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 860\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \cdot \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (2.6)$$

Em que l é o comprimento a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, Δl o alongamento induzido pela temperatura e θ_a temperatura do aço em $^{\circ}\text{C}$.

A figura 2.3 representa a variação da extensão térmica com a temperatura.

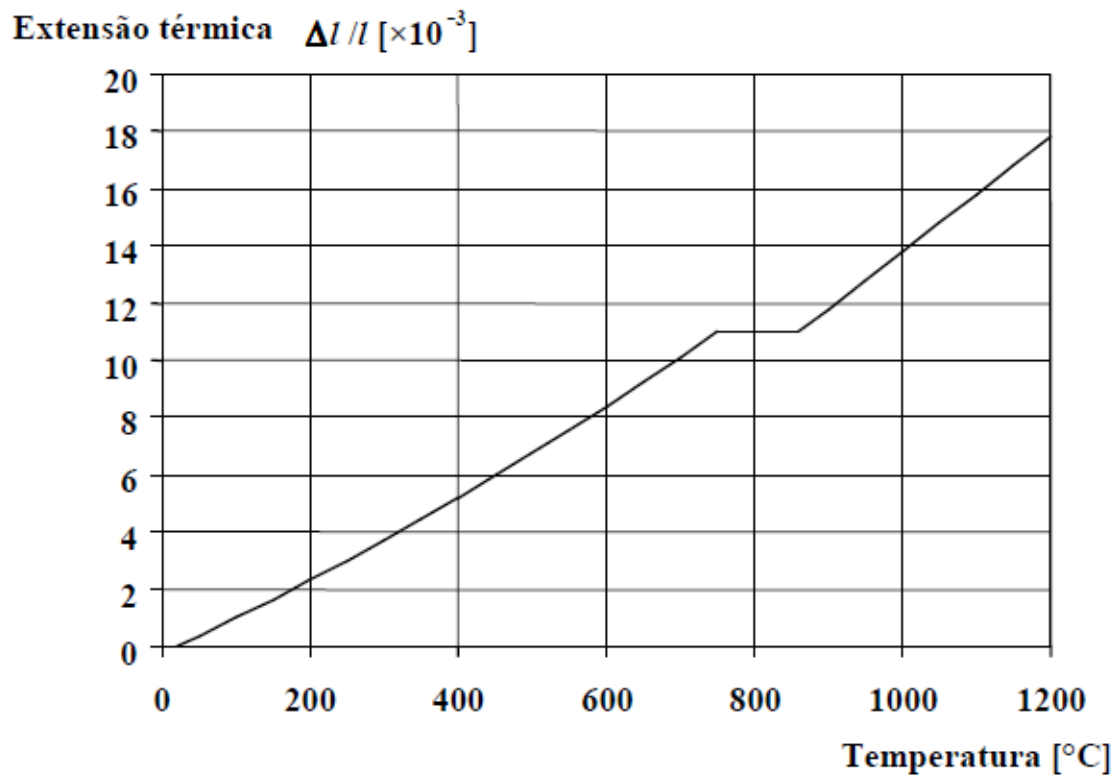


Figura 2.3: Variação da extensão térmica com a temperatura.[3]

2.2.2 Calor específico

O calor específico de um material representa sua capacidade para armazenar calor ou energia. Quantitativamente, é a energia necessária para elevar em um grau um quilograma de aço.[11]

O calor específico do aço varia com a temperatura e pode ser determinado da seguinte forma[3]:

- Para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \quad \text{J/Kg K} \quad (2.7)$$

- Para $600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad \text{J/Kg K} \quad (2.8)$$

- Para $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad \text{J/Kg K} \quad (2.9)$$

- Para $900\text{ °C} \leq \theta_a < 1200\text{ °C}$

$$c_a = 650 \quad \text{J/Kg K} \quad (2.10)$$

Em que θ_a é a temperatura do aço em °C .

Caso se opte pelo método simplificado de cálculo, o valor do calor específico pode ser considerado constante e igual a $c_a = 600 \quad \text{J/Kg K}$

A variação do calor específico com a temperatura é representada na figura 2.4.

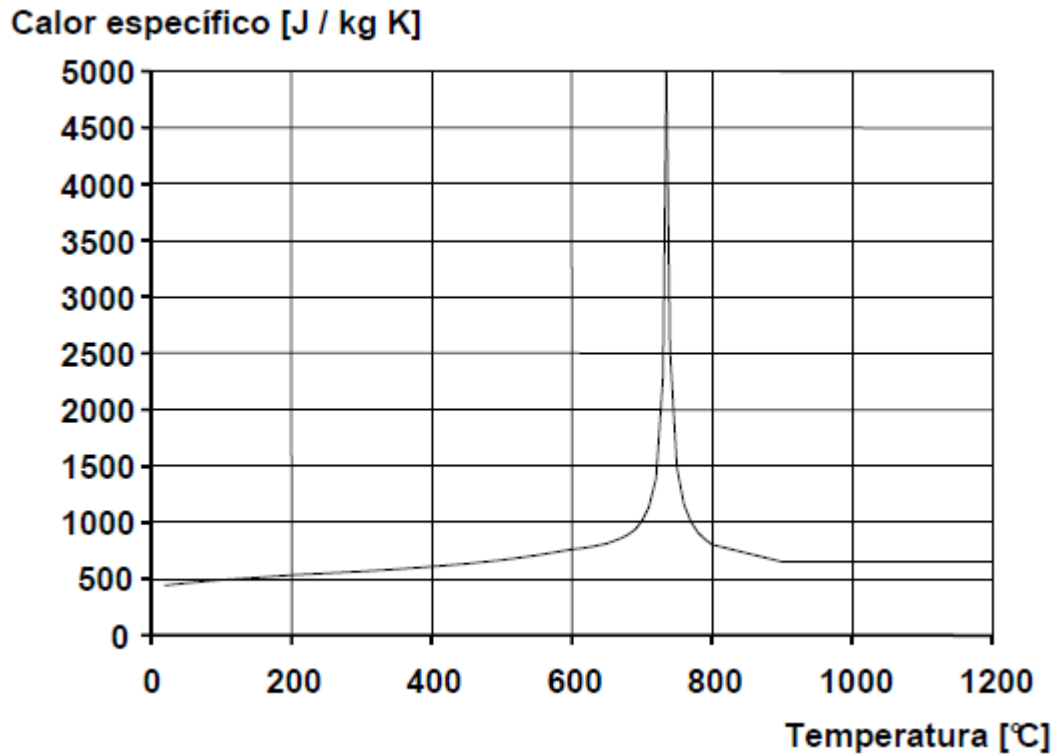


Figura 2.4: Variação do calor específico com a temperatura[3]

A descontinuidade que se verifica para temperaturas próximas de 735°C corresponde à mudança de fase do aço, de ferrite para austenite. O aumento do calor específico está associado ao calor latente existente durante esta transformação. [11]

2.2.3 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica do aço varia com a temperatura e pode ser determinada da seguinte forma [3]:

- Para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad W/mK \quad (2.11)$$

- Para $800\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$

$$\lambda_a = 27,3 \quad W/mK \quad (2.12)$$

Em que θ_a é a temperatura do aço em °C.

Caso se opte pelo método simplificado de cálculo, o valor da condutibilidade térmica pode ser considerado constante e igual a:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/mK}$$

A variação da condutibilidade térmica com a temperatura é representada na figura 2.5

Condutibilidade térmica [W / mK]

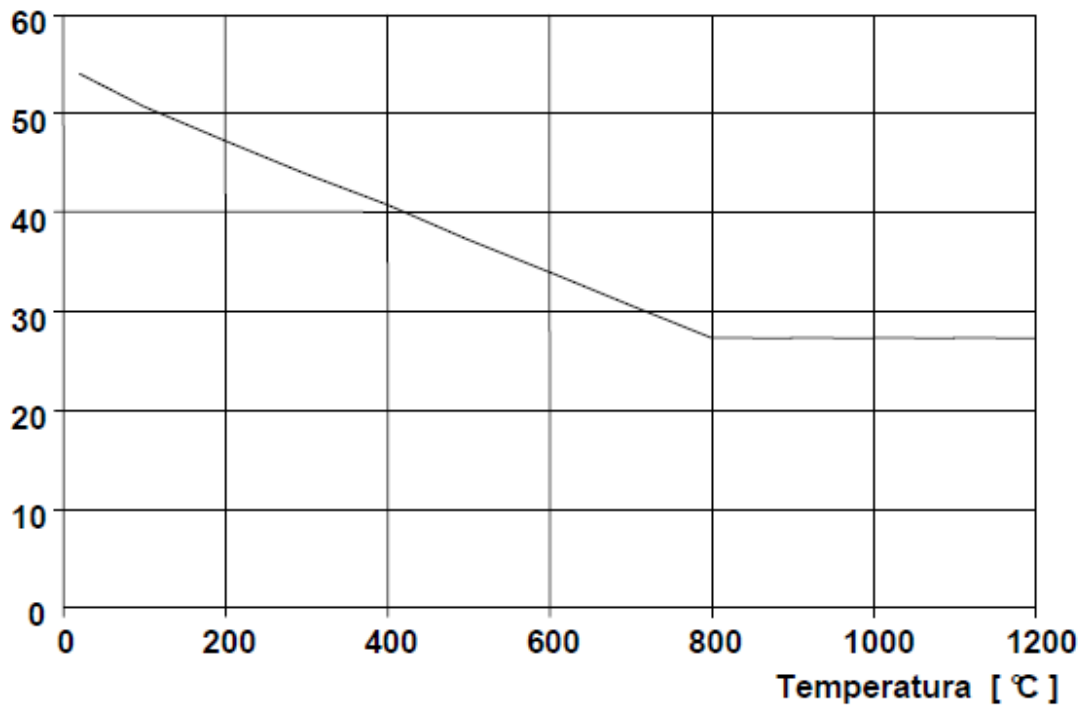


Figura 2.5: Variação da condutibilidade térmica com a temperatura[3]

A condutividade térmica varia ligeiramente com o tipo de aço e diminui com o aumento da temperatura.

Capítulo 3

Ações em estruturas em situação de incêndio

O cálculo estrutural ao fogo deve ter em conta, para além das ações mecânicas, as ações térmicas que determinam a evolução da temperatura no elemento.

3.1 Ações mecânicas

O fogo é considerado uma ação de accidental, pelo que o efeito das ações em situação de incêndio, $E_{fi,d,t}$, deve englobar as ações diretas, como as ações permanentes (G_k) e as ações variáveis (Q_k), assim como as ações indirectas resultantes das restrições às dilatações térmicas e o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do aço (A_d). [11]

Para ações accidentais o valor de cálculo deve ser obtido usando-se a seguinte combinação de acidente definida pela prEN 1990 [4].

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.1)$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Ações em estruturas em situação de incêndio

onde:

$G_{k,j}$ — valor característico das ações permanentes

P — valor do pré-esforço

A_d — valor da ação accidental

$Q_{k,1}$ — valor característico da ação variável principal ou dominante

$\psi_{1,1}$ — coeficiente de combinação associado à ação principal ou dominante

$\psi_{2,i}$ — coeficiente de combinação associado às restantes ações variáveis

Sendo o fogo considerado uma ação accidental o valor de cálculo virá

$$E_{fi,d} = G_k + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.2)$$

Com o objetivo de simplificar os cálculos, reduzindo o número de combinações de ações a considerar, o Eurocódigo 3, parte 1.2 [3] permite, no caso de uma análise por elementos, obter o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio $E_{fi,d}$, como uma percentagem η_{fi} , do valor de cálculo dos efeitos das ações obtidas a partir da combinação fundamental determinado à temperatura ambiente E_d .

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (3.3)$$

em que:

η_{fi} — fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio, dado por

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (3.4)$$

em que:

γ_G — coeficiente parcial de segurança da ação permanente à temperatura ambiente ($\gamma_G = 1,35$)

$\gamma_{Q,1}$ – coeficiente parcial de segurança da ação variável principal à temperatura ambiente ($\gamma_{Q,1} = 1,5$)

O fator de redução η_{fi} pode ser tomado igual a 0,6 para edifícios correntes das categorias A e B, igual a 0,64 para edifícios da categoria C e D e ainda igual a 0,69 para os de categoria E. A parte 1.2 do Eurocódigo 3 [3] como simplificação, recomenda a utilização do valor de $\eta_{fi} = 0,65$, exceto para edifícios da categoria E, para os quais recomenda um valor de 0,7. No entanto um valor mais preciso será sempre calculado através da expressão 3.4.

O quadro 3.1 indica os valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios.

Quadro 3.1: Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios [4]

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN < peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ^(*)			
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NOTA: Os valores de ψ poderão ser definidos no Anexo Nacional. (*) Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.			

3.2 Ações térmicas

3.2.1 Processos de transmissão de calor

A ação do fogo numa estrutura aumenta a temperatura dos elementos que a constituem, diminuindo a sua rigidez e capacidade resistente, podendo provocar o colapso desta. Neste sentido é essencial determinar a evolução do campo térmico no regime transiente e ao mesmo tempo determinar o tempo de resistência à solicitação do fogo.

As ações térmicas são definidas em termos de uma densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento (\dot{h}_{net} [W/m²]) comportando duas parcelas, uma devida à radiação ($\dot{h}_{net,r}$) e outra devida à convecção ($\dot{h}_{net,c}$), de e para o ambiente de fogo. [13]

No caso do projecto para a situação de incêndio normalizado, pode ser utilizada a curva padrão de temperatura em função do tempo (ISO834), para a qual a densidade de fluxo de calor absorvido é feito pelas duas formas de transferência [13].

Os fluxos de calor superficiais, são calculados através das expressões bem conhecidas da transferência de calor por condução, convecção e radiação. Assim, no caso de transferência de calor por convecção e radiação, as expressões são respectivamente:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (3.5)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_{res} \cdot 5,57 \times 10^{-8} [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (3.6)$$

em que:

α_c — coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m² · K]

θ_g — temperatura dos gases no compartimento de incêndio [°C]

ϕ — fator de configuração, que, de acordo com o Eurocódigo 1, Parte 1.2, deve ser tomado igual à unidade

$\varepsilon_{res} = \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f = 0,56$ — determina a emissividade resultante, função da emissividade de elemento $\varepsilon_m = 0,7$ e da emissividade do compartimento de incêndio $\varepsilon_f = 0,8$.

θ_r — temperatura de radiação na vizinhança do perfil, podendo tomar-se $\theta_r = \theta_g$ de acordo com o disposto no Eurocódigo 1, Parte 1.2.

θ_m – temperatura do perfil metálico [°C]

3.2.2 Incêndio natural

Um incêndio é resultado de um processo termoquímico muito exotérmico de oxidação. Para que este ocorra, é necessário um composto químico orgânico susceptível de oxidação (o combustível), uma substância redução/oxidante (o comburente) e uma energia de ativação.

Iniciada a reação de oxidação, também denominada de combustão ou queima, o calor desprendido pela reação mantém o processo em marcha. [15]

Um modelo de incêndio natural, esquematizado na figura 3.1, é composto por quatro fases [15]

:

- fase inicial ou ignição – valores de temperatura baixos, não havendo ainda nenhuma influência sobre o comportamento estrutural. Não sendo considerada para as curvas *temperatura x tempo* regulamentares, esta é contudo a fase mais crítica do ponto de vista da salvaguarda de vidas humanas pois nesta fase ocorre a produção de gases tóxicos;
- fase de propagação – após o *flashover*, fenómeno que ocorre para temperaturas situadas entre os 450 °C e 600 °C. É caracterizada pela propagação generalizada do incêndio e pela rápida evolução dos valores das temperaturas;
- fase de desenvolvimento pleno – queima do combustível, sendo a temperatura mantida a valores sensivelmente constantes;
- fase de extinção ou arrefecimento – caracterizada pela diminuição progressiva da temperatura, por falta de combustível, por falta de comburente ou por intervenção de sistemas de controlo (sprinklers, bombeiros, outros).

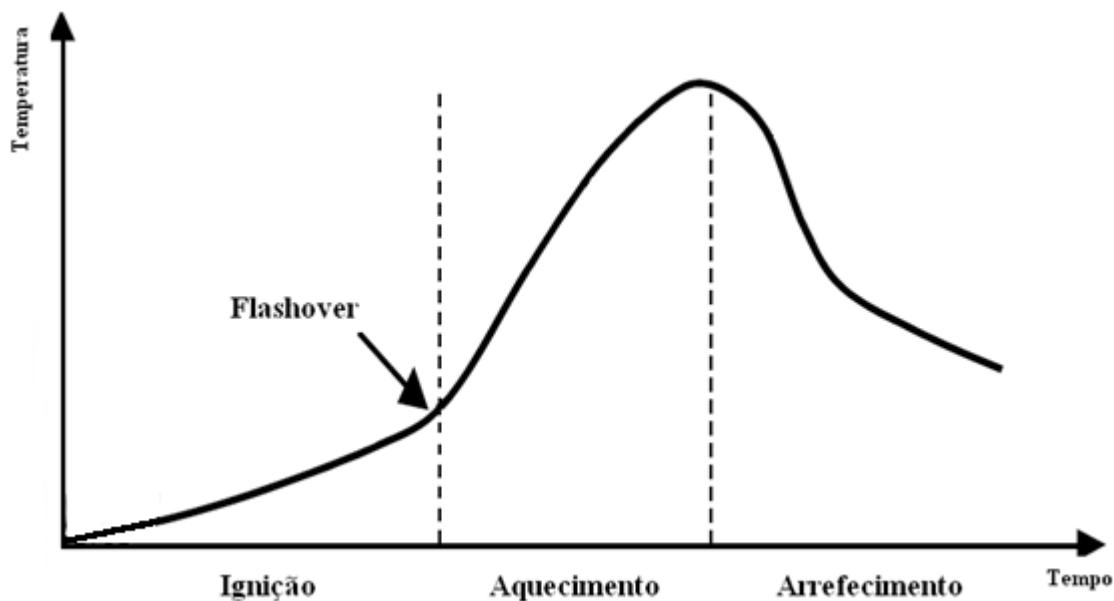


Figura 3.1: Modelo de incêndio natural (adaptado de [15])

Devido à grande variedade de situações que se podem apresentar num incêndio, e a todos os parâmetros influentes neste, torna-se difícil a modelação das temperaturas dos gases nos compartimentos de incêndio. Assim a EN 1991-1-2 [5] estabelece duas formas para obter estas temperaturas, através de curvas nominais tempo-temperatura e através de curvas paramétricas.

3.2.3 Curvas de incêndio nominais

As curvas nominais temperatura-tempo são curvas definidas por equações simples, e não dependem de certos parâmetros físicos, como acontece com as curvas paramétricas. Não possuem fase de ignição nem fase de arrefecimento, quando comparadas com o modelo de incêndio natural.

Segundo a EN 1991-1-2, existem três curvas nominais [5]:

- Curva de incêndio padrão (ISO 834)

$$\theta_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8t + 1) \quad (3.7)$$

- Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores

$$\theta_g = 20 + 660 \times (1 - 0,687 \times e^{-0,32 \times t} - 0,31 \times e^{-3,8 \times t}) \quad (3.8)$$

- Curva de incêndio para hidrocarbonetos

$$\theta_g = 20 + 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167 \times t} - 0,675 \times e^{-2,5 \times t}) \quad (3.9)$$

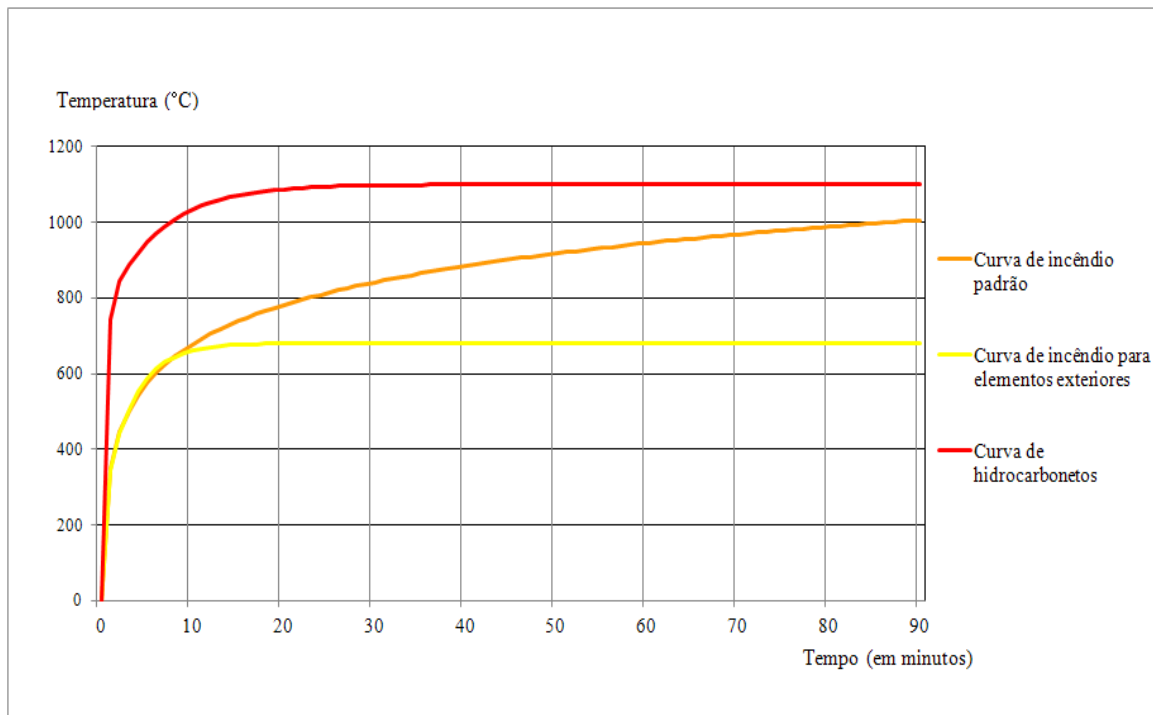


Figura 3.2: Desenvolvimento das curvas nominais

3.2.4 Curvas de incêndio paramétricas

As curvas paramétricas são, tal como as curvas nominais, curvas de evolução da temperatura em função do tempo, mas que dependem de certos parâmetros físicos tais como a densidade de carga de incêndio, as condições de ventilação e das propriedades das paredes envolventes do compartimento de incêndio .

Estas curvas aproximam-se mais da realidade por possuírem fase de arrefecimento, e por terem em conta os principais parâmetros que influenciam a extensão e o desenvolvimento do incêndio, ao contrário das curvas nominais. [15]

No entanto, o seu uso é limitado a compartimentos com uma área inferior a quinhentos metros quadrados, sem aberturas no teto e com uma altura máxima de quatro metros.

De seguida apresentam-se, pela ordem as quais devem ser utilizadas, as equações presentes no Anexo A da EN 1991-1-2 , equações essas dependentes dos parâmetros que influenciam o incêndio e necessárias para o cálculo da curva paramétrica [5] [10] [15]:

- Cálculo da inércia térmica da parede envolvente, b ,com os seguintes limites :
 $100 \leq b \leq 2200$

$$b = \sqrt{c\rho\lambda} \quad [J/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K] \quad (3.10)$$

onde:

- | | | |
|-------------|--|------------------|
| c – | calor específico da envolvente do compartimento | $[J/Kg \cdot K]$ |
| ρ – | massa específica da envolvente do compartimento | $[Kg/m^3]$ |
| λ – | condutividade térmica da envolvente do compartimento | $[W/m \cdot K]$ |

- Cálculo do fator de abertura com os seguintes limites: $0,02 \leq O \leq 0,20$

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad [m^{1/2}] \quad (3.11)$$

onde:

A_v — área total das aberturas verticais em todas as paredes $[m^2]$

h_{eq} — média pesada da altura das aberturas verticais em todas as paredes $[m]$

A_t — área total da superfície envolvente $[m^2]$

- Cálculo do fator tempo Γ , função do fator de abertura O_{lim} e da inércia térmica b

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad (3.12)$$

- Determinação da duração mínima da fase de aquecimento t_{lim} em horas, em função da velocidade de propagação do incêndio

Tabela 3.1: Duração mínima da fase de aquecimento t_{lim} [15]

Velocidade de propagação do incêndio	t_{lim}
Lenta	25 minutos
Média	20 minutos
Rápida	15 minutos

Tabela 3.2: Tipo de ocupação [15]

Ocupação	Velocidade de propagação do incêndio
Habitação	Média
Hospital (quarto)	Média
Hotel (quarto)	Média
Biblioteca	Rápida
Escritório	Média
Sala de aulas em escola	Média
Centro comercial	Rápida
Teatro (cinema)	Rápida
Transportes (espaços públicos)	Lenta

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Ações em estruturas em situação de incêndio

- Cálculo do tempo máximo t_{max} correspondente à temperatura máxima

$$t_{max} = 0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O \quad (3.13)$$

onde:

$q_{t,d}$ – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio referida à área A_t , da superfície envolvente e devem observar-se os seguintes limites: $50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ MJ/m}^2$

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (3.14)$$

onde:

A_f – área do pavimento, e

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (3.15)$$

onde:

m – fator de combustão, que para materiais celulósicos pode ser tomado como $m = 0,8$, ou conservativamente pode tomar-se $m = 1,0$

δ_{q1} – fator parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função da dimensão do compartimento – tabela 3.3

δ_{q2} – parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função do tipo de ocupação – tabela 3.4

$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$ – fator parcial que tem em conta as diferentes medidas activas de segurança contra incêndio. Estas medidas de segurança activas são geralmente impostas por razões de proteção das vidas dos ocupantes – tabela 3.5

$q_{f,k}$ – valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento MJ/m^2 – tabela 3.6

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Ações em estruturas em situação de incêndio

Tabela 3.3: Fator parcial δ_{q1} que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento [15]

Área em planta do compartimento A_f (m^2)	Perigo de activação do incêndio δ_{q1}
25	1,10
250	1,50
2500	1,90
5000	2,00
10000	2,13

Tabela 3.4: Fator parcial δ_{q2} que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação [15]

Exemplos de ocupação	Perigo de activação do incêndio δ_{q2}
Galeria de arte, museu, piscina	0,78
Escritórios, habitação, hotel, indústria de papel	1,00
Fabrico de motores e maquinaria	1,22
Laboratório químico, oficina de pintura	1,44
Pirotecnia, fabrico de tintas	1,66

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Ações em estruturas em situação de incêndio

Tabela 3.5: Fator parcial δ_{qn} que tem em conta as diferentes medidas activas de segurança contra incêndio [15]

Extinção automática	Sistema de extinção automática por água		δ_{n1}	0,61
	Redes suplementares independentes	0	δ_{n2}	1,0
		1		0,87
		2		0,7
Deteção automática	Deteção automática e alarme	Por calor	δ_{n3}	0,87
		Por fumo	δ_{n4}	0,73
	Transmissão automática do alarme para o corpo de bombeiros		δ_{n5}	0,87
Extinção manual	Bombeiros de empresa		δ_{n6}	0,61
	Sapadores bombeiros		δ_{n7}	0,78
	Vias de acesso seguras		δ_{n8}	0,9
				1,0
				1,5
	Menos de 1ª intervenção		δ_{n9}	1,0
				1,5
	Sistemas de evacuação de fumos		δ_{n10}	1,0
				1,5

Tabela 3.6: Valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento MJ/m^2 [15]

Ocupação	Valor médio	Quantilho 80%
Habitação	780	948
Hospital (quarto)	230	280
Hotel (quarto)	310	377
Biblioteca	1500	1824
Escritório	420	511
Sala de aulas em escola	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cinema)	300	365
Transportes (espaços públicos)	100	122

- Se $t_{max} > t_{lim}$ então o incêndio é controlado pela ventilação

- A temperatura durante a fase de aquecimento, isto é, até $t = t_{max}$, é dado por

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (3.16)$$

onde:

$$t^* = \Gamma t$$

- A temperatura durante a fase de arrefecimento é dado por

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^*) \quad \text{para } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (3.17)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*) \quad \text{para } 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (3.18)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^*) \quad \text{para } t_{max}^* > 2 \quad (3.19)$$

onde:

$$t_{max}^* = \Gamma t_{max}$$

θ_{max} é dada pela equação 3.16 em que $t^* = t_{max}^*$

- Se $t_{max} \leq t_{lim}$ então o incêndio é controlado pela carga de incêndio

- Cálculo do fator de abertura modificado O_{lim}

$$O_{lim} = 0,1 \times 10^{-3} q_{t,d} / t_{lim} \quad (3.20)$$

- Cálculo do fator Γ

$$\Gamma = [O_{lim}/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad (3.21)$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Ações em estruturas em situação de incêndio

- Se $O > 0,04$ e $q_{t,d} < 75$ e $b < 1160$, Γ_{lim} obtido pela equação 3.21 tem de ser multiplicado pelo fator k

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (3.22)$$

- A temperatura durante a fase de aquecimento, isto é, até $t = t_{max}$, é dado pela equação 3.16 onde $t^* = \Gamma t_{lim}$
- A temperatura durante a fase de arrefecimento é dado por

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t_{lim}^*) \quad \text{para } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (3.23)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{lim}^*) \quad \text{para } 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (3.24)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{lim}^*) \quad \text{para } t_{max}^* \geq 2 \quad (3.25)$$

onde:

$$t_{lim}^* = \Gamma_{lim} t$$

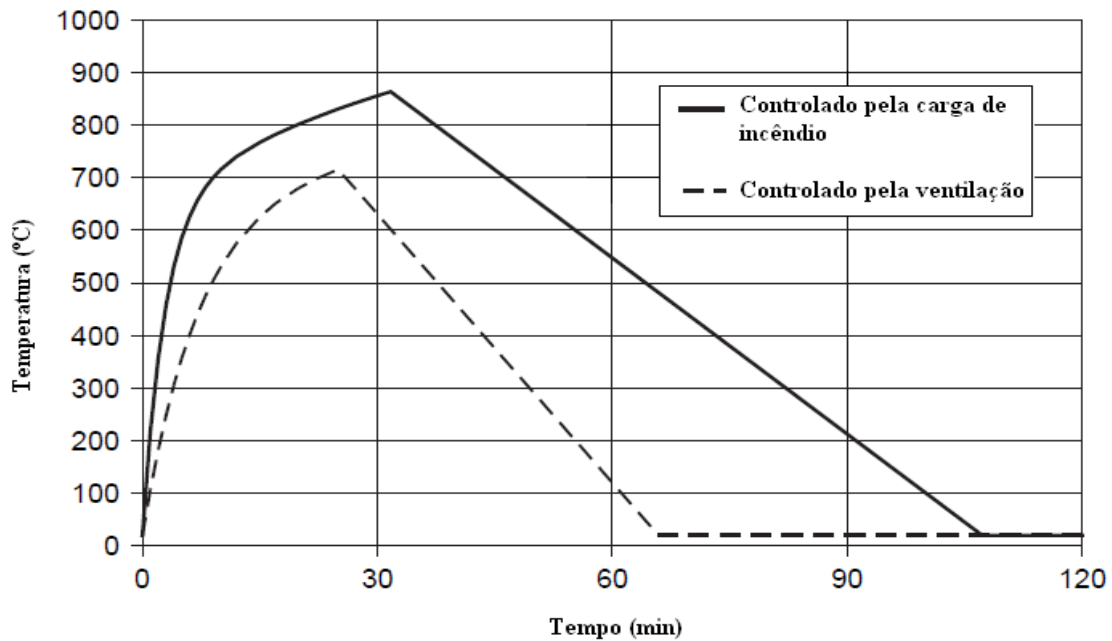


Figura 3.3: Desenvolvimento de curvas paramétricas[10]

Capítulo 4

Evolução da temperatura no elemento

Para obter a evolução da temperatura do elemento, pode-se usar modelos avançados de cálculo, que têm como base métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos, e modelos de cálculo simples, que permitem obter o aumento de temperatura de modo homogêneo para toda a secção transversal e ao longo do comprimento do elemento de interesse, por meio de simples equações analíticas presentes na EN 1991-1-2 [5].

Neste capítulo apenas será analisado o método de cálculo simples com base nas equações descritas na EN 1991-1-2, e que considera uma temperatura uniforme no interior do perfil metálico .

4.1 Fator de massividade ou fator de forma

O aço, sendo um material com uma elevada condutividade térmica, aquece rapidamente quando sujeito a aumentos de temperatura. No entanto, existem secções que aquecem mais rapidamente do que outras muito devido às suas dimensões. Para ter isto em conta no dimensionamento ao fogo existe um fator a ter em consideração, fator de forma ou fator de massividade, que é calculado para elementos não protegidos com base na relação entre a área exposta da secção por unidade de comprimento e o volume por unidade de comprimento.

$$A_m/V \quad (m^{-1}) \quad (4.1)$$

onde:

A_m — área exposta por unidade de comprimento $[m^2/m]$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Evolução da temperatura no elemento

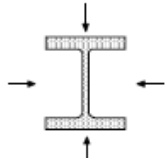
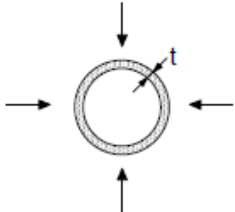
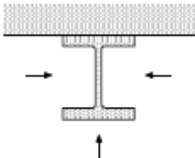
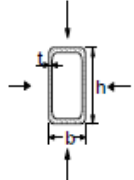
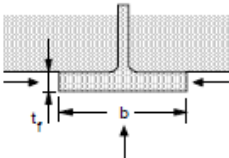
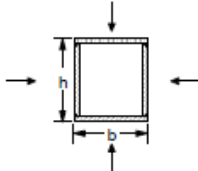
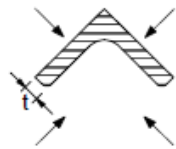
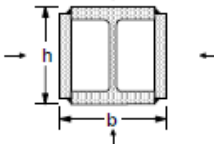
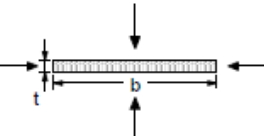
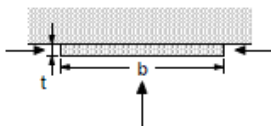
V — volume por unidade de comprimento $[m^3/m]$

Para barras prismáticas, o fator de forma ou fator de massividade resulta na relação entre o perímetro exposto ao fogo, P e a área da secção reta do elemento, A . [15]

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \times l}{A \times l} = \frac{P}{A} \quad (4.2)$$

Em que l é um dado comprimento do elemento.

Quadro 4.1: Fator de massividade A_m/V para elementos de aço não protegidos [3]

<p><i>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p><i>Tubo exposto ao fogo em todos os lados: $A_m/V = 1/t$</i></p> 
<p><i>Secção aberta exposta ao fogo em três lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície exposta ao fogo}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p><i>Secção tubular (ou secção em caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados:</i> Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p><i>Banzo de secção em I exposto ao fogo em três lados:</i></p> $A_m/V = (b + 2t_f)/(bt_f)$ Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$ 	<p><i>Secção em caixão soldada exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$ 
<p><i>Cantoneira exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $A_m/V = 2/t$ 	<p><i>Secção em I com reforço em caixão, exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ 
<p><i>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $A_m/V = 2(b+t)/(bt)$ Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$ 	<p><i>Barra plana exposta ao fogo em três lados:</i></p> $A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$ 

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Evolução da temperatura no elemento

No caso de elementos protegidos, o fator de forma ou massividade é calculada pela expressão

$$A_p/V \quad (m^{-1}) \quad (4.3)$$

onde:

A_p — área da superfície interior da proteção, correspondente à superfície de exposição ao incêndio por unidade de comprimento $[m^2/m]$

V — volume por unidade de comprimento $[m^3/m]$

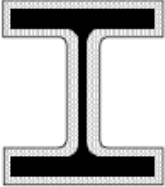
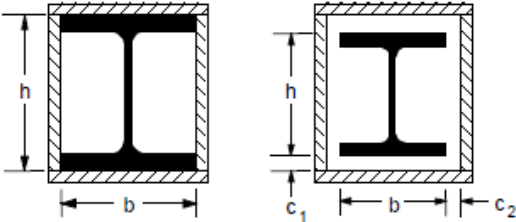
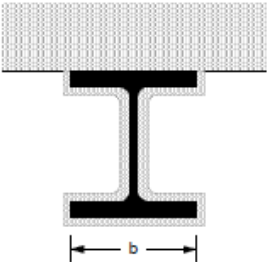
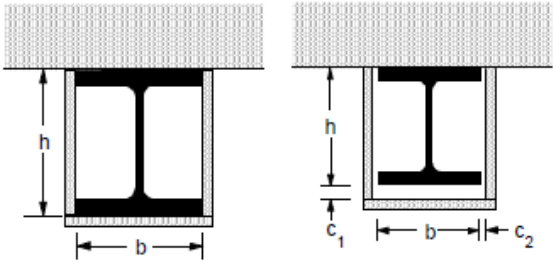
Para barras prismáticas, o fator de forma ou fator de massividade resulta na relação entre o perímetro interior da proteção, P e a área da secção reta do elemento, A . [15]

$$\frac{A_p}{V} = \frac{P \times l}{A \times l} = \frac{P}{A} \quad (4.4)$$

Em que l é um dado comprimento do elemento.

O aumento de temperatura é proporcional ao fator de forma ou fator de massividade. Um valor alto do fator de forma implica que o elemento aqueça com mais facilidade.

Quadro 4.2: Fator de massividade A_p/V para elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio [3]

<i>Esquema</i>	<i>Descrição</i>	<i>Factor de massividade (A_p/V)</i>
	<i>Revestimento de contorno com espessura uniforme</i>	$\frac{\text{perímetro do aço}}{\text{área da secção transversal do aço}}$
	<i>Revestimento em caixão com espessura uniforme¹⁾</i>	$\frac{2(b + h)}{\text{área da secção transversal do aço}}$
	<i>Revestimento de contorno com espessura uniforme, exposto ao fogo em três lados</i>	$\frac{\text{perímetro do aço} - b}{\text{área da secção transversal do aço}}$
	<i>Revestimento em caixão com espessura uniforme, exposto ao fogo em três lados¹⁾</i>	$\frac{2h + b}{\text{área da secção transversal do aço}}$

¹⁾ Normalmente as dimensões da folga, c_1 e c_2 , não deverão exceder $h/4$.

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Evolução da temperatura no elemento

Tabela 4.1: Temperatura em secções não protegidas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834 [10]

$A_m^*/V [m^{-1}]$ $V/A_m^* [mm]$	400 2.5	200 5.0	100 10.0	60 16.7	40 25.0	25 40.0
Time [min.]	Steel temperature in °C					
0	20	20	20	20	20	20
5	430	291	177	121	90	65
10	640	552	392	276	204	142
11	661	587	432	308	228	159
12	678	616	469	340	253	177
13	693	642	503	371	278	194
14	705	663	535	402	303	212
15	716	682	565	432	328	230
16	725	698	591	460	353	249
17	732	711	616	487	377	267
18	736	721	638	513	401	286
19	743	729	658	538	425	304
20	754	734	676	561	447	323
21	767	738	692	583	470	341
22	780	744	706	604	491	360
23	790	754	717	623	512	378
24	799	767	726	641	532	396
25	807	780	732	658	551	414
26	813	792	735	674	570	431
27	820	803	740	688	588	449
28	826	813	746	701	604	466
29	831	821	756	712	621	482
30	837	828	767	721	636	498
31	842	835	780	728	651	514
32	847	841	793	733	665	530
33	852	846	805	736	678	545
34	856	851	816	740	690	559
35	861	856	827	745	701	573
36	865	861	836	753	711	587
37	870	866	844	763	719	601
38	874	870	852	774	726	614
39	878	874	859	786	731	626
40	882	878	865	798	734	638
45	900	897	890	852	761	692

4.2 Elementos não protegidos

Considerando uma temperatura uniforme em toda a secção, a EN 1991-1-2 [5] disponibiliza a seguinte equação para o cálculo da variação da temperatura num dado intervalo de tempo

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (4.5)$$

em que:

A_m/V –	fator de massividade para os elementos de aço não protegidos	$[m^{-1}]$
A_m –	área de superfície do elemento por unidade de comprimento	$[m^2/m]$
V –	volume do elemento por unidade de comprimento	$[m^3/m]$
c_a –	calor específico do aço	$[J/KgK]$
$\dot{h}_{net,d}$ –	valor de cálculo do fluxo de calor efetivo por unidade de área	$[W/m^2]$
Δt –	intervalo de tempo	$[s]$
ρ_a –	massa específica do aço	$[Kg/m^3]$
k_{sh} –	fator de correção para o efeito de sombra	

com:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b / [A_m/V] \quad (4.6)$$

em que:

$[A_m/V]_b$ – fator de massividade calculado como se o perfil tivesse proteção em caixa $[m^{-1}]$

Para secções em I sujeitas às ações do fogo nominal, o fator de correção para o efeito de sombra poderá ser determinado a partir de

$$k_{sh} = 0,9 \cdot [A_m/V]_b/[A_m/V] \quad (4.7)$$

Para elementos com fator de massividade inferior a $10 [m^{-1}]$ a equação 4.5 não deve ser utilizada. Será necessário, neste caso, implementar um processo iterativo de forma a obter a evolução da temperatura no elemento à custa desta equação[15]

Isto acontece porque um fator de massividade muito baixo implica que a secção aqueça lentamente, não podendo se considerar uma temperatura uniforme na secção.

4.3 Elementos protegidos

De acordo com a EN 1991-1-2 [5], considerando uma temperatura uniforme em toda a secção transversal, o aumento de temperatura de um elemento isolado durante um intervalo de tempo deverá ser determinado a partir da seguinte equação

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (4.8)$$

com:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p/V \quad (4.9)$$

em que:

A_p/V – fator de massividade para os elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio $[m^{-1}]$

A_p – área apropriada do material de proteção contra incêndio por unidade de comprimento do elemento $[m^2/m]$

V – volume do elemento por unidade de comprimento $[m^3/m]$

c_a – calor específico do aço dependente da temperatura $[J/Kg \cdot K]$

c_p – calor específico do material de proteção contra incêndio independente da temperatura
[J/Kg · K]

d_p – espessura do material de proteção contra incêndio [m]

Δt – intervalo de tempo [s]

$\theta_{a,t}$ – temperatura do aço no instante t [°C]

$\theta_{g,t}$ – temperatura ambiente dos gases no instante t [°C]

$\Delta\theta_{g,t}$ – aumento da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δt [°C]

λ_p – condutibilidade termica do sistema de proteção contra incêndio [W/m · K]

ρ_a – massa específica do aço [Kg/m³]

ρ_p – massa específica do material de proteção contra incêndio [Kg/m³]

O valor λ_p refere-se geralmente a materiais de proteção secos. No caso de existência de humidade no material de proteção, a evolução da temperatura no elemento sofre um atraso t_v quando este atinge a temperatura de 100 °C. O tempo de atraso t_v é calculado através da expressão [15]:

$$t_v = \frac{p \rho_p d_p^2}{5 \lambda_p} \text{ (minutos) } (p \text{ em } \%) \quad (4.10)$$

onde:

λ_p – condutibilidade termica do sistema de proteção contra incêndio [W/m · K]

ρ_p – massa específica do material de proteção contra incêndio [Kg/m³]

d_p – espessura do material de proteção contra incêndio [m]

p – teor de humidade

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Evolução da temperatura no elemento

Tabela 4.2: Temperatura em secções protegidas sujeitas ao incêndio padrão ISO 834 [10]

k_p [W/m^3K]	200	400	600	800	1200	2000
Time [min.]	Steel temperature in $^{\circ}C$					
0	20	20	20	20	20	20
10	37	54	70	85	113	163
20	60	97	130	160	215	304
30	84	139	188	232	306	421
40	108	181	244	298	388	514
50	132	222	296	359	459	589
60	156	260	345	414	520	650
70	179	298	391	465	573	699
80	202	333	433	510	620	730
90	225	367	472	552	661	743
100	247	399	509	589	695	773
110	268	430	542	623	721	816
120	289	459	573	654	734	859
130	310	486	602	681	744	900
140	330	512	629	705	765	935
150	349	537	654	723	795	965
160	368	560	677	733	828	990
170	386	582	697	739	861	1013
180	404	603	714	751	892	1032
190	422	623	727	769	921	1049
200	439	642	734	792	948	1065
210	455	660	738	817	972	1078
220	471	677	747	843	993	1090
230	487	692	760	869	1013	1101
240	502	706	777	893	1031	1112

Capítulo 5

Materiais e sistemas de proteção ao fogo

Quando não é verificada a segurança ao fogo de um elemento estrutural pode-se agir de duas formas. Uma forma é aumentar a secção do elemento (diminuir o fator de massividade) e a outra é utilizar materiais de proteção ao fogo. Geralmente recorre-se à segunda forma por esta ser mais económica e por permitir maiores períodos de resistência ao fogo.

5.1 Materiais de proteção

Os materiais de proteção devem apresentar características tais como [15]:

- Capacidade para se deformar quando sujeito a aumento de temperatura
- Baixa condutividade térmica
- Perfeita aderência à estrutura em que são aplicadas
- Capacidade para resistir ao choque, a agentes atmosféricos e químicos

Existem vários materiais que são utilizados na proteção ao fogo. Na tabela 5.1 apresentam-se as propriedades de alguns dos materiais mais comuns utilizados como proteção contra o fogo.

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Materiais e sistemas de proteção ao fogo

Tabela 5.1: Propriedades de materiais mais comuns utilizados como proteção contra o fogo [15]

Material	Densidade $\rho_p [Kg/m^3]$	Teor. humidade $p \%$	Condutividade térmica $\lambda_p [W/m \cdot K]$	Calor específico $c_p [J/(Kg \cdot K)]$
Materiais de projeção				
• Fibra mineral	300	1	0.12	1200
• Cimento de vermiculite	350	15	0.12	1200
• Perlite	350	15	0.12	1200
Materiais de projeção de alta densidade				
• Vermiculite/perlite e cimento	550	15	0.12	1100
• Vermiculite/perlite e gesso	650	15	0.12	1100
Placas				
• Vermiculite/perlite e cimento	800	15	0.20	1200
• Silicato fibroso ou silicato de cálcio fibroso	600	3	0.15	1200
• Fibrocimento	800	5	0.15	1200
• Placas de gesso	800	20	0.20	1700
Placas de fibras compactas				
• Silicato fibroso, lã mineral, lã de rocha	150	2	0.20	1200
Materiais cerâmicos				
• Betão	2300	4	1.60	1000
• Betão leve	1600	5	0.80	840
• Blocos de betão	2200	8	1.00	1200
• Tijolo cerâmico vazado	1000	-	0.40	1200
• Tijolo cerâmico não vazado	2000	-	1.20	1200

5.1.1 Betão

O betão normal ou leve (celular) é correntemente utilizado como material de proteção, envolvendo o elemento estrutural a proteger, em torno da qual é lançado contido por cofragens ou sob a forma de placas pré-fabricadas, que se ligam à estrutura por dispositivos adequados.

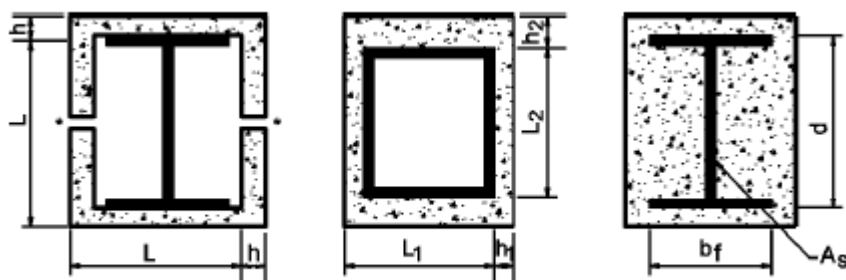


Figura 5.1: Exemplos de envolvimento com betão[17]

5.1.2 Gesso

O gesso é um mineral aglomerante produzido a partir do aquecimento da gipsita, um mineral abundante na natureza, e posterior redução a pó da mesma. É composto principalmente por sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e pelo hemidrato obtido pela calcinação deste ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Como se pode observar pela constituição molecular, o gesso no estado seco contém água, e quando submetido a elevadas temperaturas, a água absorve calor para se vaporizar, atrasando o aumento da temperatura do gesso, fazendo deste um bom material de proteção.[15]

5.1.3 Vermiculite

A vermiculite pertence à família das micas, sendo uma rocha mineral que se apresenta sob a forma de lâminas finas separadas por partículas microscópicas de água, apresentando um aspecto esfoliado. A constituição mineral micácea e o seu ponto de fusão em torno de 1370°C tornam este material excelente para a fabricação de painéis protetores, que não libertam fumos nem gases tóxicos quando sujeitos às altas temperaturas, mas apenas vapor de água.

A vermiculite expandida utiliza-se como agregado, originando diversos materiais de proteção térmica em função da associação escolhida. Quando ligada ao cimento ou ao gesso permite

produzir argamassas leves com elevado desempenho. A sua aplicação deve ocorrer durante a fase de montagem das estruturas, pois requer limpeza após a aplicação. Depois de aplicada, apresenta acabamento rústico e pode receber uma pintura a base de epóxi, uma vez decorrido o tempo de secagem.[15]

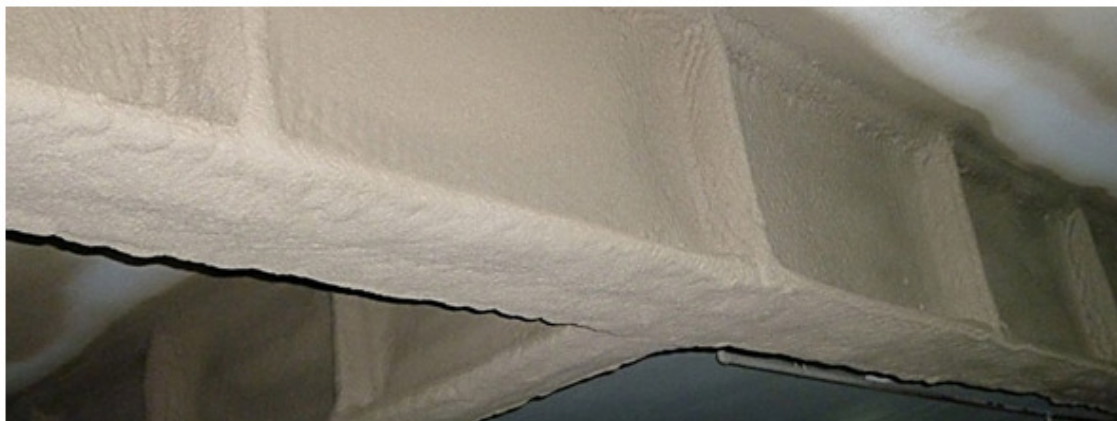


Figura 5.2: Isolamento em vermiculite [16]

5.1.4 Fibras minerais

As fibras minerais são materiais obtidos artificialmente fazendo passar uma corrente de vapor através de um líquido constituído por rochas ou escórias vulcânicas fundidas, dependendo a natureza das fibras da composição das rochas utilizadas no seu fabrico. Estes materiais aplicam-se geralmente por projeção pneumática mas também existem em placas rígidas ou semi-rígidas.[15]

5.1.5 Argila expandida e betões leves

São agregados leves de formato esférico, com uma estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e uma superfície rígida e resistente. São incombustíveis, tem excelentes propriedades de isolamento térmico, é económico a sua utilização e são de fácil aplicação

5.1.6 Tintas intumescentes

São tintas que reagem ao calor. O processo é iniciado quando a temperatura da superfície atinge valores na ordem de 100 a 300°C, formando uma camada protetora que pode atingir várias dezenas de vezes a espessura do filme de tinta inicial. [15]

Neste processo são liberados gases atóxicos que atuam em conjunto com resinas especiais formando uma espuma rígida na superfície da estrutura, provocando o retardamento da elevação das temperaturas nos elementos metálicos.

As tintas intumescentes são os produtos de melhor acabamento estético para a proteção de estruturas metálicas.

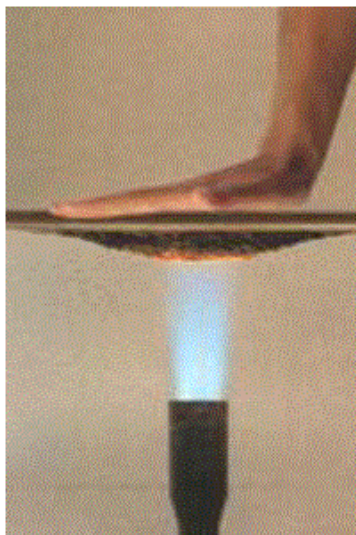


Figura 5.3: Tinta intumescente

5.2 Sistemas de proteção

O sistema de proteção e os materiais a utilizar dependem de fatores tais como, natureza e finalidade da construção, ambiente em que se encontra o elemento a proteger, o tipo de elemento e o custo.

A proteção do elemento pode ser feita de várias formas tais como [15]:

- Proteção por envolvimento total
- Proteção por resguardos ou ecrãs
- Proteção por material projectado ou tintas intumescentes
- Proteção por caixão
- Proteção por circulação de água
- Arrefecimento por instalação de sprinkler

5.2.1 Proteção por envolvimento total

O envolvimento total consiste em envolver completamente com material protetor todo o perfil. Esta proteção realiza-se geralmente com betão simples, tirando partido da resistência mecânica deste.

5.2.2 Proteção por resguardos ou ecrãs

A proteção por resguardos ou ecrãs consiste na utilização de placas rígidas sob a forma de tetos falsos suspensos ou painéis de parede de forma a retardar o aquecimento da estrutura.

5.2.3 Proteção por material projetado ou tintas intumescentes

Consiste na aplicação de tintas intumescentes ou de um reboco de argamassas adequadas acompanhando o contorno do perfil. O tipo de proteção obtido depende da espessura da proteção e do tipo de material utilizado. A aplicação pode ser feita acompanhando ou não o contorno do perfil, utilizando-se quase sempre uma rede metálica.

5.2.4 Proteção por caixão

Este revestimento consiste na aplicação sobre a superfície a proteger de placas pré-fabricadas de betão celular, de cimento e vermiculite e de gesso, seja acompanhando o contorno, seja formando caixão.

O processo exige cuidados especiais na ligação das placas umas às outras e ao perfil, para que se possa obter a proteção desejada.

5.2.5 Proteção por circulação de água

Esta técnica consiste em provocar um arrefecimento por água em circulação. Os pilares, que devem ser ocos, são ligados nas suas extremidades superior e inferior a um circuito fechado por condutas e cheios de água. O nível de água mantém-se constante por um ou mais reservatórios colocados superiormente, que servem ao mesmo tempo de vaso de expansão, de evaporação e de compensação de perdas. Quando os pilares são atingidos pelas chamas devido a um incêndio,

aquecem e estabelece-se uma circulação natural, devido à força ascensional da água aquecida, arrastando o calor de modo semelhante a um aquecimento central de água quente, arrefecendo, portanto a estrutura.

5.2.6 Arrefecimento por instalação de sprinklers

Sistema de proteção ativo que consiste num sistema de fornecimento de água que providencia uma pressão adequada e um fluxo a um sistema de canos de distribuição de água nos quais estão conectados os sprinklers.

Cada sprinkler é mantido fechado com uma cápsula de vidro ou duas peças metálicas ligadas com uma liga metálica. A cápsula ou as peças metálicas aplicam pressão sobre uma tampa que impede a saída da água. Quando a temperatura ambiente em redor do sprinkler atinge uma dada temperatura de “ativação” a cápsula ou a liga metálica é destruída libertando a tampa, activando assim o sistema.

Capítulo 6

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

O dimensionamento de estruturas de aço ao fogo pode ser dividido em três níveis. Estes níveis de análise correspondem aos três métodos de dimensionamento seguintes, de complexidade crescente [15]:

- Método de Nível 1 – método no qual se determina analiticamente a resistência ao fogo de um elemento sujeito a um dos incêndios nominais, a curva de incêndio padrão ISO 834, a curva de incêndio para elementos exteriores ou a curva de incêndio de hidrocarbonetos. A verificação de projeto ao fogo pode ser feita nos três domínios
- Método de Nível 2 – método designado por Método do Tempo Equivalente de Exposição ao Fogo Padrão, faz uso do conceito de incêndio natural, traduzido pelas curvas paramétricas apresentadas na secção 3.2.3 do capítulo 3. O método consiste em calcular a temperatura do aço a partir da curva de incêndio padrão ISO 834, para um tempo fictício denominado tempo equivalente de exposição ao incêndio padrão, $t_{e,d}$. Este instante de tempo corresponde ao intervalo de tempo para o qual, sob a ação do incêndio padrão, a temperatura do aço é igual à temperatura máxima que o elemento atingiria se estivesse sujeito ao incêndio natural, como se mostra na figura 6.1.

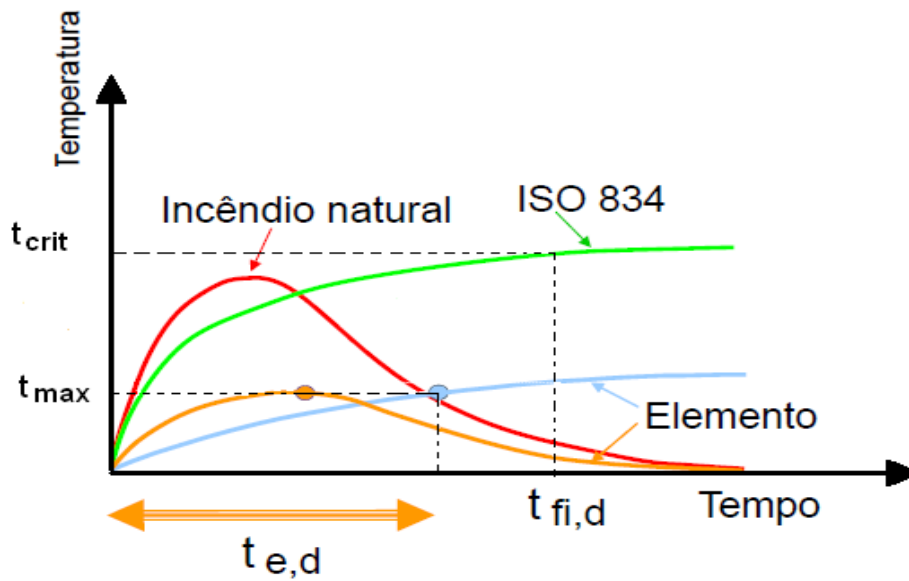


Figura 6.1: Tempo equivalente de exposição ao fogo[15]

- Método de Nível 3 – método que abandona por completo o conceito de “Incêndio Padrão” e de “Resistência ao Fogo” tal como foram definidos. Como curvas temperatura-tempo são adoptadas as do “Incêndio Natural”, expresso pelas curvas paramétricas definidas na secção 3.2.3 do capítulo 3. A temperatura crítica é calculada de acordo com a equação 6.34.

O cálculo estrutural ao fogo pode ser feito segundo três níveis de sofisticação crescentes:

- Utilização de tabelas obtidas à custa de ensaios experimentais em fornalha;
- Métodos simplificados de cálculo, fazendo uso de fórmulas analíticas aplicáveis apenas a elementos estruturais isolados;
- Métodos avançados de cálculo, os quais podem ser usados na simulação do comportamento de:
 - Estrutura global;

- Partes da estrutura, como por exemplo pórticos ou sub-estruturas em que há necessidade de determinar as condições de fronteira que nelas atuam, as quais se consideram constantes durante a ocorrência de incêndio;
- Elementos estruturais isolados, tais como vigas, pilares ou lajes, desprezando qualquer interação entre eles.

A verificação de projeto ao fogo pode ser feita em três domínios[15]:

- No domínio da resistência estrutural onde o valor de cálculo do efeito das ações em situação de incêndio $E_{fi,d,t}$, obtido com base na combinação accidental deve ser inferior ao valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio $R_{fi,d,t}$, no instante $t_{fi,requ}$

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

- No domínio da temperatura onde a temperatura do elemento quando sujeito ao incêndio nominal durante o tempo $t_{fi,requ}$, deve ser inferior à temperatura crítica $\theta_{cr,d}$

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}$$

- No domínio temporal onde o valor de cálculo de resistência ao fogo $t_{fi,d}$ deve ser superior à resistência ao fogo exigida regulamentarmente $t_{fi,requ}$

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

6.1 Classificação das secções

6.1.1 À temperatura ambiente

Quando se procede à verificação da resistência de secções é necessário a sua classificação. Para isso o Eurocódigo 3, parte 1.1 [2] faz referência a quatro classes classificando-as em função dos seguintes critérios:

- esbelteza das suas paredes
- resistência de cálculo
- capacidade de rotação plástica
- risco de encurvadura local

A ideia desta classificação é a de prever que tipos de desestabilização podem ocorrer nas secções, visto que problemas de instabilidade local, em solicitações de flexão, compressão e flexão com compressão, podem desencadear a cedência prematura das secções sem se atingirem as suas máximas capacidades resistentes.

O Eurocódigo 3, parte 1.1 [2] define as classes de secções transversais de peças da seguinte forma:

- classe 1 – as secções transversais que podem mobilizar a sua resistência plástica, sem risco de ocorrência de encurvadura local, e possuindo uma grande capacidade de rotação que permita a formação de uma rotula plástica. São as secções mais estáveis;
- classe 2 – as secções transversais que podem mobilizar a sua resistência plástica, sem risco de ocorrer encurvadura local, mas com uma capacidade de rotação limitada.
- classe 3 – as secções que podem mobilizar a sua resistência elástica nas fibras extremas, mas não a sua resistência plástica em virtude do risco de ocorrência de encurvadura local;

- classe 4 – as secções transversais que não podem atingir a sua resistência elástica em virtude do risco de ocorrência de encurvadura local

Quadro 6.1: Relações Limites máximas das relações largura-espessura para componentes comprimidos (almas) [2]

Componentes internos comprimidos						
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396 \epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \epsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456 \epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \epsilon}{\alpha}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$		quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1^7$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

⁷ $\psi \leq -1$ aplica-se quando a tensão de compressão $\sigma \leq f_y$ ou quando a extensão de tracção $\epsilon_v > f_y/E$.

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

Quadro 6.2 - Relações Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (consolas) [2]

Banzos em consola						
Secções laminadas				Secções soldadas		
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão				
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver a EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

6.1.2 A temperatura elevada

Os critérios de classificação das secções expostas na secção anterior são válidos tanto para a temperatura ambiente como para temperaturas elevadas. No entanto, neste último caso, deve utilizar-se um valor reduzido de ϵ dado por

$$\epsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y}$$

Onde f_y é a tensão de cedência a 20 °C expressa em Mpa

6.2 Elementos tracionados

O valor de cálculo da resistência $N_{fi,\theta,Rd}$ de um elemento tracionado com uma temperatura uniforme θ_a deverá ser determinado a partir de [3]:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad (6.1)$$

em que:

$k_{y,\theta}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a , atingida no instante t , definido no quadro 2.1

N_{Rd} — valor de cálculo da resistência da secção transversal $N_{pl,Rd}$ à temperatura normal, de acordo com a EN 1993-1-1[2]

$\gamma_{M,0}$ — fator parcial de segurança da resistência das secções transversais ($\gamma_{M,0} = 1,0$)

$\gamma_{M,fi}$ — fator parcial de segurança para o material em situação de incêndio ($\gamma_{M,fi} = 1,0$)

O valor de cálculo da resistência $N_{fi,t,Rd}$ no instante t de um elemento tracionado com uma distribuição de temperatura não uniforme na secção transversal poderá ser determinado a partir de:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad (6.2)$$

em que:

A_i — uma área elementar da secção transversal com uma temperatura θ_i

$k_{y,\theta,i}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_i

θ_i — temperatura na área elementar A_i

O valor de cálculo da resistência $N_{fi,t,Rd}$ no instante t de um elemento tracionado com uma distribuição de temperatura não uniforme poderá ser considerado, de modo conservativo, igual ao valor de cálculo da resistência $N_{fi,\theta,Rd}$ de um elemento tracionado com a mesma secção

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

tansversal e com uma temperatura uniforme do aço θ_a igual à temperatura máxima do aço $\theta_{a,max}$ atingida no instante t .

6.3 Elementos comprimidos com secções transversais da classe 1, da classe 2 ou da classe 3

O valor de cálculo da resistência à encurvadura $N_{b,fi,t,Rd}$ no instante t de um elemento comprimido com uma secção transversal da classe 1, da classe 2 ou da classe 3 com uma temperatura uniforme θ_a deverá ser determinado a partir de [3]:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (6.3)$$

em que:

χ_{fi} — coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio

$k_{y,\theta}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t definido quadro 2.1

O valor de χ_{fi} deverá ser considerado igual ao menor dos valores de $\chi_{y,fi}$ e de $\chi_{z,fi}$ determinado de acordo com:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (6.4)$$

com

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right] \quad (6.5)$$

e

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y} \quad (6.6)$$

A esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{\theta}$ para a temperatura θ_a , é obtida por:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} [k_{y,\theta}/k_{E,\theta}]^{0.5} \quad (6.7)$$

em que:

$k_{y,\theta}$ – fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t definido no quadro 2.1

$k_{E,\theta}$ – fator de redução para a inclinação da recta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t , definido no quadro 2.1

$\bar{\lambda}$ – esbelteza adimensional calculada a frio de acordo com a equação 6.9 mas utilizando o comprimento de encurvadura em situação de incêndio l_{fi}

A esbelteza adimensional $\bar{\lambda}$ é dada por

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (6.8)$$

Em que λ é a esbelteza do elemento, dada neste caso em função do comprimento de encurvadura em situação de incêndio, por

$$\lambda = \frac{l_{fi}}{i} \quad (6.9)$$

Em que i é o raio de giração da secção transversal e λ_1 é dado por

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon \quad (6.10)$$

Com

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad (6.11)$$

em que:

E – módulo de elasticidade linear à temperatura ambiente

f_y – tensão de cedência à temperatura ambiente

O comprimento de encurvadura l_{fi} de uma coluna em situação de incêndio deverá em geral ser determinado como à temperatura normal. No entanto, num pórtico contraventado, o

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

comprimento de encurvadura l_{fi} de um tramo de uma coluna poderá ser determinado considerando-a encastrada nos tramos das colunas dos compartimentos de incêndio por cima e por baixo, tanto para as ligações contínuas como semicontínuas, desde que a resistência ao fogo dos elementos do edifício que separam estes compartimentos de incêndio não seja inferior à resistência ao fogo da coluna.

No caso de um pórtico contraventado no qual cada piso constitua um compartimento de incêndio separado com resistência ao fogo suficiente, o comprimento de encurvadura l_{fi} de uma coluna contínua de um piso intermédio será $l_{fi} = 0,5L$ e no ultimo piso o comprimento de encurvadura será $l_{fi} = 0,7L$ em que L é o comprimento da coluna no piso relevante

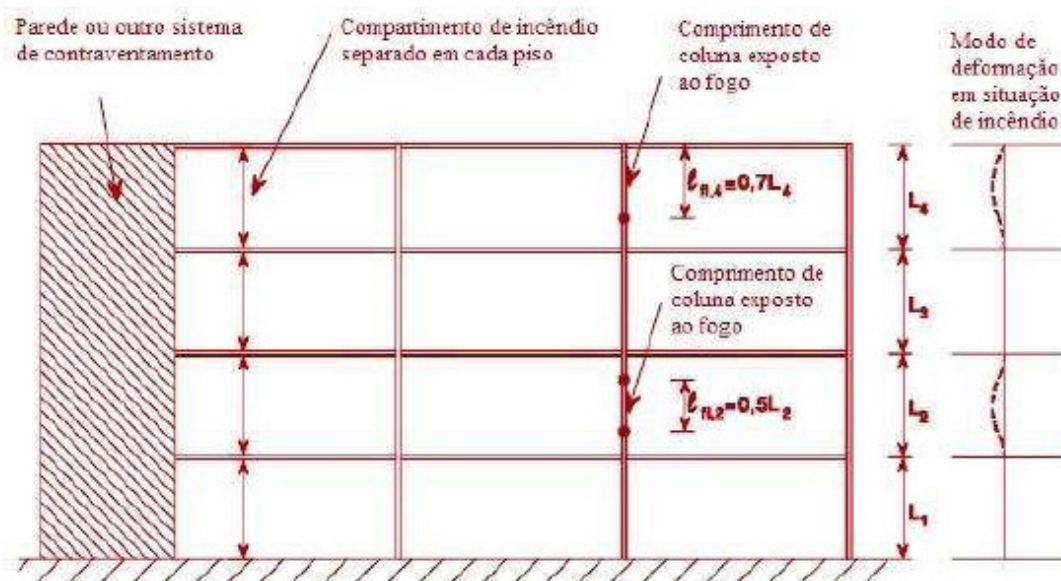


Figura 6.2: Comprimentos de encurvadura l_{fi} de colunas em pórticos contraventados [3]

No cálculo utilizando a exposição ao fogo nominal, o valor de cálculo da resistência $N_{b,fi,t,Rd}$ no instante t de um elemento comprimido com uma distribuição de temperatura não uniforme poderá ser considerado igual ao valor de cálculo da resistência $N_{b,fi,\theta,Rd}$ de um elemento comprimido com a mesma secção transversal e com uma temperatura uniforme do aço θ_a igual à temperatura máxima do aço $\theta_{a,max}$ atingida no instante t .

6.4 Vigas com secções transversais da classe 1 ou da classe 2

O valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ de uma secção transversal da classe 1 ou da classe 2 com uma temperatura uniforme θ_a deverá ser determinado a partir de [3]:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad (6.12)$$

em que:

- M_{Rd} – valor de cálculo do momento plástico resistente da secção transversal bruta $M_{pl,Rd}$ à temperatura normal, de acordo com a EN 1993-1-1 [2], ou momento resistente reduzido à temperatura normal, tendo em conta os efeitos do esforço transversal, se necessário, de acordo com a EN 1993-1-1 [2]
- $k_{y,\theta}$ – fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t definido no quadro 2.1

O valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ no instante t de uma secção transversal da classe 1 ou da classe 2 com uma distribuição de temperatura não uniforme poderá ser determinado a partir de:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi} \quad (6.13)$$

em que:

- z_i – distância desde o eixo neutro plástico até ao centro de gravidade da área elementar A_i
- $f_{y,i}$ – valor nominal da tensão de cedência f_y para a área elementar A_i , considerando positivo na zona de compressão da secção transversal limitada pelo eixo neutro plástico e negativo na zona de tracção
- A_i – uma área elementar da secção transversal com uma temperatura θ_i
- $k_{y,\theta,i}$ – fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_i

Em alternativa, o valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ no instante t de uma secção transversal da classe 1 ou da classe 2 num elemento com uma distribuição de temperatura não uniforme, poderá ser determinado a partir de:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / (\kappa_1 \kappa_2) \text{ mas } M_{fi,\theta,Rd} \leq M_{Rd} \quad (6.14)$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

em que:

$M_{fi,\theta,Rd}$ — valor de cálculo do momento resistente da secção transversal para uma temperatura uniforme θ_a no instante t numa secção transversal que não é termicamente influenciada pelos apoios

κ_1 — fator de adaptação para a temperatura não uniforme na secção transversal

κ_2 — fator de adaptação para a temperatura não uniforme ao longo da viga

O valor do fator de adaptação κ_1 para a distribuição de temperatura não uniforme numa secção transversal deverá ser o seguinte:

- para uma viga exposta dos quatro lados: $\kappa_1 = 1,0$
- para uma viga não protegida exposta em três lados, com uma laje mista ou de betão apoiada no quarto lado: $\kappa_1 = 0,70$
- para uma viga protegida exposta em três lados, com uma laje mista ou de betão apoiada no quarto lado: $\kappa_1 = 0,85$

Para uma distribuição de temperatura não uniforme ao longo de uma viga, o fator de adaptação κ_2 deverá ser considerado igual a:

- nos apoios de uma viga hiperestática: $\kappa_2 = 0,85$
- em todos os outros casos: $\kappa_2 = 1,0$

O valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral $M_{b,fi,t,Rd}$ no instante t de um elemento sem travamento lateral com uma secção transversal da classe 1 ou da classe 2 deverá ser determinado a partir de:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (6.14)$$

em que:

$\chi_{LT,fi}$ — coeficiente de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio

$k_{y,\theta,com}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido $\theta_{a,com}$ atingida no instante t , definido no Quadro 2.1 pode

admitir-se, de modo conservativo, que $\theta_{a,com}$ é igual à temperatura uniforme θ_a

O valor de $\chi_{LT,fi}$ deverá ser determinado de acordo com as seguintes expressões:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (6.15)$$

Com

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (6.16)$$

e

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{y,\theta,com}/k_{E,\theta,com}]^{0.5} \quad (6.18)$$

em que:

$k_{E,\theta,com}$ — fator de redução para a inclinação da recta que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido $\theta_{a,com}$ atingida no instante t , definido no quadro 2.1

O valor de cálculo da resistência ao esforço transversal $V_{fi,t,Rd}$ no instante t de uma secção transversal da classe 1 ou da classe 2 deverá ser determinado a partir de:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} V_{Rd} [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \quad (6.19)$$

em que:

V_{Rd} — valor de cálculo da resistência ao esforço transversal da secção transversal bruta à temperatura normal, de acordo com a EN 1993-1-1 [2]

θ_{web} — temperatura média na alma da secção

$k_{y,\theta,web}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_{web}

6.5 Vigas com secções transversais da classe 3

O valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ no instante t de uma secção transversal da classe 3 deverá ser determinado a partir de [3]:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad (6.20)$$

em que:

M_{Rd} — valor de cálculo do momento elástico resistente da secção transversal bruta $M_{el,Rd}$ à temperatura normal, de acordo com a EN 1993-1-1, ou momento resistente reduzido, tendo em conta os efeitos do esforço transversal, se necessário, de acordo com a EN 1993-1-1 [2]

$k_{y,\theta}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t definido no quadro 2.1

O valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ no instante t de uma secção transversal da classe 3 num elemento com uma distribuição de temperatura não uniforme, poderá ser determinado a partir de:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} M_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] / (\kappa_1 \kappa_2) \text{ mas } M_{fi,\theta,Rd} \leq M_{Rd} \quad (6.21)$$

em que:

M_{Rd} — valor de cálculo do momento elástico resistente da secção transversal bruta $M_{el,Rd}$ à temperatura normal, ou momento resistente reduzido, tendo em conta os efeitos do esforço transversal, se necessário, de acordo com a EN 1993-1-1 [2]

$k_{y,\theta,max}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura $\theta_{a,max}$ atingida no instante t definido no quadro 2.1

κ_1 — fator de adaptação para a temperatura não uniforme na secção transversal

κ_2 — fator de adaptação para a temperatura não uniforme ao longo da viga

O valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral $M_{b,fi,t,Rd}$ no instante t de um elemento sem travamento lateral com uma secção transversal da classe 3 deverá ser determinado a partir de:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (6.22)$$

em que:

- $\chi_{LT,fi}$ — coeficiente de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio
- $k_{y,\theta,com}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido $\theta_{a,com}$ atingida no instante t , definido na tabela pode admitir-se, de modo conservativo, que $\theta_{a,com}$ é igual à temperatura uniforme θ_a

O valor de cálculo da resistência ao esforço transversal $V_{fi,t,Rd}$ no instante t de uma secção transversal da classe 3 deverá ser determinado a partir de:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} V_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad (6.23)$$

em que:

- V_{Rd} — valor de cálculo da resistência ao esforço transversal da secção transversal bruta à temperatura normal, de acordo com a EN 1993-1-1 [2]
- θ_{web} — temperatura média na alma da secção
- $k_{y,\theta,web}$ — fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_{web}

6.6 Elementos com secções transversais das classes 1,2 ou 3, sujeitos a flexão composta com compressão

O valor de cálculo da resistência à encurvadura $R_{fi,t,d}$ no instante t de um elemento sujeito a flexão composta com compressão deverá ser verificado satisfazendo as seguintes expressões [3]:

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

Para um elemento com uma secção transversal da classe 1 ou da classe 2

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (6.24)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (6.25)$$

Para um elemento com uma secção transversal da classe 3

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{el,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (6.26)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (6.27)$$

em que:

$\chi_{min,fi}$ — definido em 6.3

$\chi_{LT,fi}$ — coeficiente de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio

$\chi_{z,fi}$ — definido em 6.3

e

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (6.28)$$

com

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (6.29)$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (6.30)$$

Para o eixo de maior inércia:

$$\mu_y = (2\beta_{M,y} - 5)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} + 0,29 \leq 0,8 \quad (6.31)$$

com $\bar{\lambda}_{y,20^\circ\text{C}} \leq 1,1$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{z,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (6.32)$$

Para o eixo de menor inércia:

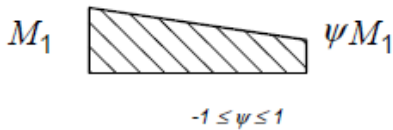
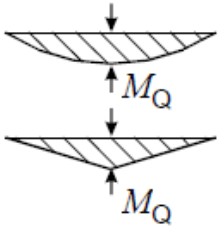
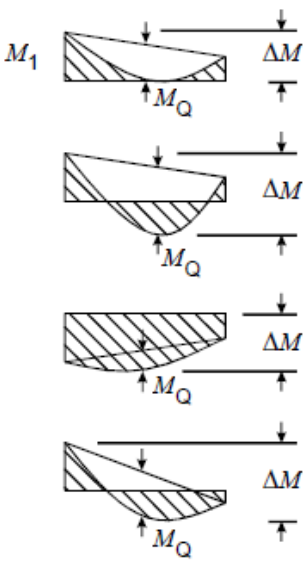
$$\mu_z = (1,2\beta_{M,z} - 3)\bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71\beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \quad (6.33)$$

Para os coeficientes de momento uniforme equivalente β_M deve-se consultar o quadro 6.3.

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

Quadro 6.3: Coeficientes de momento uniforme equivalente β_M [3]

Diagrama de momentos	Coeficiente de momento uniforme equivalente β_M
<p><i>Momentos nas extremidades</i></p>  <p>M_1 ψM_1</p> <p>$-1 \leq \psi \leq 1$</p>	<p>$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \psi$</p>
<p><i>Momentos devidos a cargas laterais no plano</i></p>  <p>M_Q</p> <p>M_Q</p>	<p>$\beta_{M,Q} = 1,3$</p> <p>$\beta_{M,Q} = 1,4$</p>
<p><i>Momentos devidos a cargas laterais no plano e a momentos nas extremidades</i></p>  <p>M_1 M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p>	<p>$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$</p> <p>$M_Q = \max M$ devido unicamente à carga lateral</p> <p>$\Delta M = \begin{cases} \max M & \text{para o diagrama de momentos sem mudança de sinal} \\ \max M + \min M & \text{para o diagrama de momentos com mudança de sinal} \end{cases}$</p>

6.7 Temperatura crítica

Segundo o Eurocódigo 3, no caso da verificação ser feita no domínio da temperatura, e não for necessário ter em conta os fenómenos de instabilidade, a temperatura crítica $\theta_{a,cr}$ do aço no

instante t para uma distribuição de temperatura uniforme num elemento poderá ser determinada para qualquer grau de utilização μ_0 no instante $t = 0$ utilizando:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674\mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (6.34)$$

em que μ_0 não deverá ser inferior a 0,013

Para elementos com secções transversais das Classes 1,2 ou 3 e para todo os elemetos tracionados, o grau de utilização μ_0 no instante $t = 0$ poderá ser obtido de:

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0} \quad (6.35)$$

em que:

$R_{fi,d,0}$ — correspondente valor de cálculo em situação de incêndio

$E_{fi,d}$ — como apresentado na secção 3.1.1 do capítulo 3

Em alternativa, para os elementos tracionados e para as vigas onde a encurvadura lateral não representa um modo de colapso potencial, μ_0 pode ser obtido, de modo conservativo, a partir de:

$$\mu_0 = \eta_{fi} [\gamma_{M,fi}/\gamma_{M0}] \quad (6.36)$$

em que:

η_{fi} — como apresentado secção 3.1.2 do capítulo 3

Para elementos com secções transversais da Classe 4, que não sejam peças tracionadas, deve tomar-se para temperatura crítica um valor constante e igual a $\theta_{a,cr} = 350^\circ\text{C}$.

Na figura seguinte pode-se observar a variação da temperatura crítica com o grau de utilização.

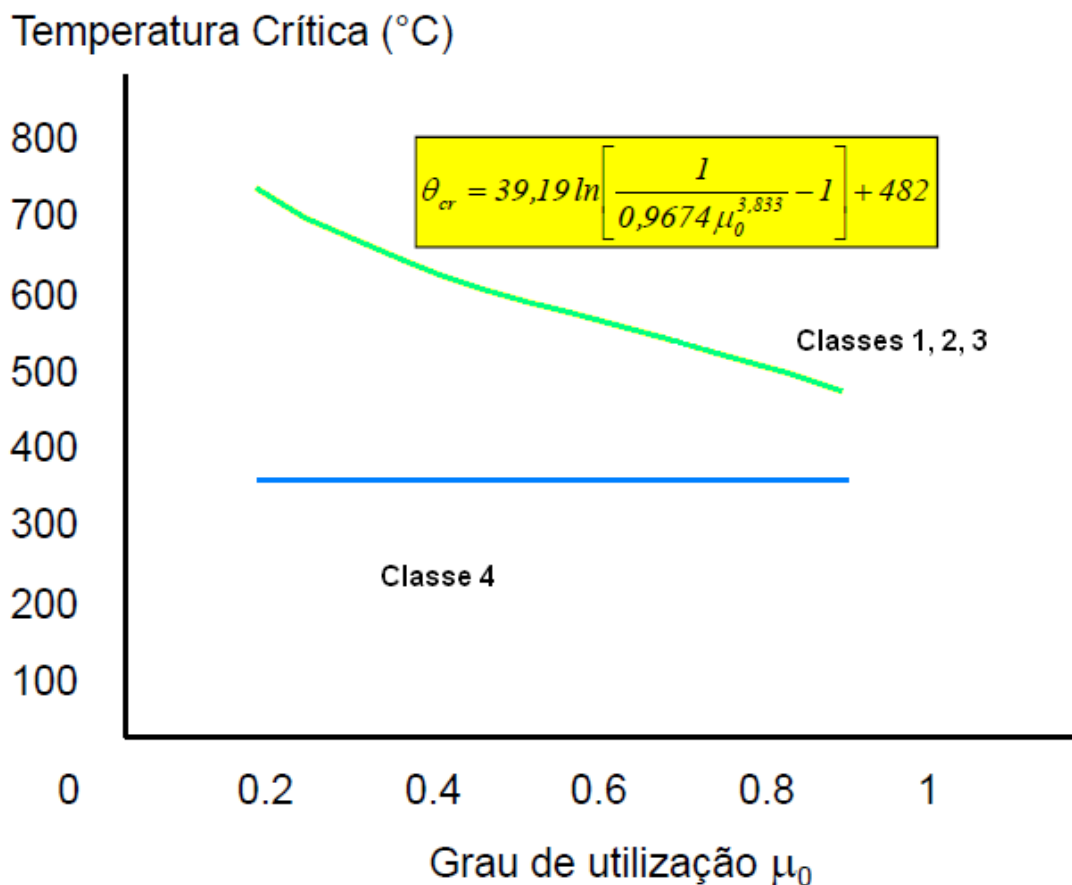


Figura 6.3: Variação da temperatura crítica com o grau de utilização[15]

O cálculo da temperatura crítica para elementos sujeitos a fenómenos de instabilidade, como por exemplo a encurvadura em elementos comprimidos e a encurvadura lateral em elementos sujeitos a flexão, é um cálculo iterativo pois o Eurocódigo 3 considera o grau de utilização igual ao fator de redução da tensão de cedência, $\mu_0 = k_{y,\theta}$, independente da temperatura se a resistência do elemento for diretamente proporcional à tensão de cedência do aço, como acontece nos elementos tracionados e nos elementos sujeitos a flexão simples sem risco de encurvadura lateral.[15]

6.8 Tempo equivalente de exposição ao fogo

Segundo o Eurocódigo 1 a abordagem seguinte destina-se a ser aplicada aos casos em que o projecto dos elementos se efectua por meio de valores tabelados, ou de outras regras simplificadas tendo por base a exposição ao incêndio padrão ISO 834, mas usando condições de incêndio realistas.

O objectivo do tempo equivalente de exposição ao fogo é obter valores de temperaturas mais próximos da realidade do que os valores obtidos pelos métodos simplificados.

De acordo com o Anexo F do Eurocódigo 1 [5], se as densidades de carga de incêndio forem definidas sem ter especificamente em conta o comportamento da combustão, a abordagem a seguir descrita deve limitar-se aos compartimentos de incêndio com cargas de incêndio predominantemente celulósicas, que são as mais usuais nos edifícios correntes.

O tempo equivalente de exposição ao incêndio padrão ISO 834 é então dado por:

$$\begin{aligned} t_{e,d} &= (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c \\ &= (q_{t,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c \end{aligned} \quad (6.37)$$

em que:

q_d – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio definido na secção 3.2.3 do capítulo 3

k_b – fator de conversão definido na tabela 6.2

w – fator de ventilação definido mais tarde nesta secção.

Sendo

$$w_t = w_f A_t / A_f \quad (6.38)$$

em que:

A_f – área do pavimento do compartimento de incêndio

A_t – área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas)

k_c – fator de correção, função do material que compõe a secção transversal dos elementos estruturais, definidos na tabela 6.1

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

Tabela 6.1: Fator de correção k_c em função do material [5]

Material da secção transversal	Fator de correcção k_c
Betão armado	1,0
Aço protegido	1,0
Aço não protegido	$13,7 \cdot 0$

Nos casos em que não se efectua uma avaliação pormenorizada das propriedades térmicas da envolvente, pode considerar-se $k_b = 0,07 \text{ min} \cdot \text{m}^2/\text{MJ}$ quando q_d é dado em MJ/m^2 .

Caso contrário k_b pode ser relacionado com a propriedade térmica $b = \sqrt{c\rho\lambda}$ da envolvente de acordo com a tabela 6.2

Tabela 6.2: Fator de conversão k_b [5]

$b = \sqrt{c\rho\lambda}$ $\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$	k_b $\text{min} \cdot \text{m}^2/\text{MJ}$
$b < 720$	0,07
$720 \leq b \leq 2500$	0,055
$b > 2500$	0,04

O fator de ventilação w_f pode ser calculado por:

$$w_f = (6,0/H)^{0,3} [0,62 + 90(0,4 - \alpha_v)^4/(1 + b_v\alpha_h)] \geq 0,5 \quad (6.39)$$

em que:

$\alpha_v = A_v/A_f$ – área das aberturas verticais A_v na fachada por unidade de área do pavimento do compartimento de incêndio, onde o limite $0,025 \leq \alpha_v \leq 0,25$

$\alpha_h = A_h/A_f$ – área das aberturas horizontais A_h no teto, por unidade de área do pavimento do compartimento de incêndio

H – altura do compartimento de incêndio em metros

$$b_v = 12,5(1 + 10\alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10,0 \quad (6.40)$$

Para pequenos compartimentos de incêndio ($A_f < 100 \text{ m}^2$) sem aberturas no teto, o fator w_f também pode ser calculado por:

$$w_f = O^{-1/2} \cdot A_f / A_t \quad (6.41)$$

em que:

O – fator de abertura definido pela equação 3.11

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Dimensionamento de estruturas de aço ao fogo

Capítulo 7

Exemplo prático

Para ilustrar os conceitos de verificação estrutural ao fogo apresentados anteriormente, considera-se o pórtico representado na figura, inserido numa zona de habitações e sujeito ao incêndio padrão ISO 834. O espaçamento entre pórticos é de 8 metros. A viga suporta uma laje de betão não solidarizada, não funcionando portanto como viga mista. A laje impede a encurvadura lateral da viga. Admite-se uma carga permanente nominal igual a $1,5 \text{ kN/m}^2$, uma acção do vento com valor característico igual a 45 kN e uma sobrecarga igual a 2 kN/m^2 . Considera-se que os pilares são constituídos por perfis IPE 300, a viga é constituída por um perfil IPE 300 e o contraventamento por um perfil HEB 120, todos em aço S235. Considera-se também que os elementos devem ter uma estabilidade ao fogo de 30 minutos (EF30).

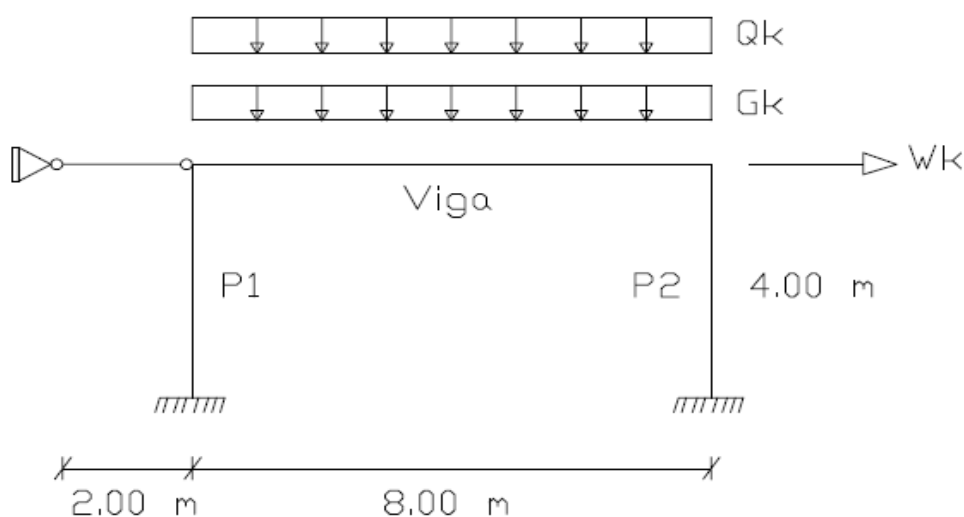


Figura 7.1: Pórtico contaventado

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

Pela equação 3.2 o valor de cálculo da ação do fogo é:

$$E_{fi,d} = G_k + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Nesse caso, considerando a sobrecarga como ação variável base, tem-se:

$$E_{fi,d} = G_k + 0,5 \cdot q_k + 0 \cdot w_k$$

Obtém-se assim, utilizando o programa de cálculo automático Ftool [20], os seguintes diagramas de esforços

Esforço axial (KN):

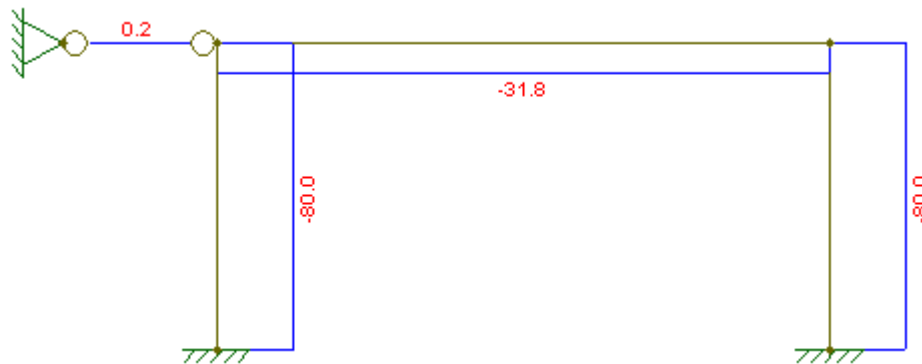


Figura 7.2: Diagrama do esforço axial para sobrecarga como ação variável base

Esforço transversal (KN):

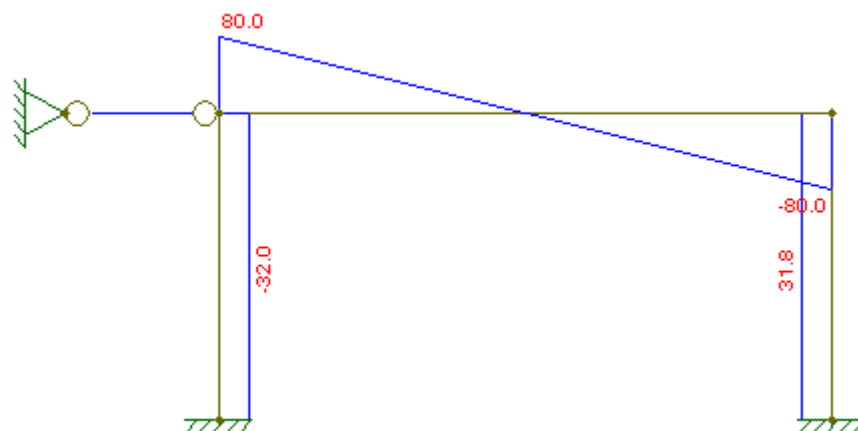


Figura 7.3: Diagrama do esforço transversal para sobrecarga como ação variável base

Momento fletor (KNm):

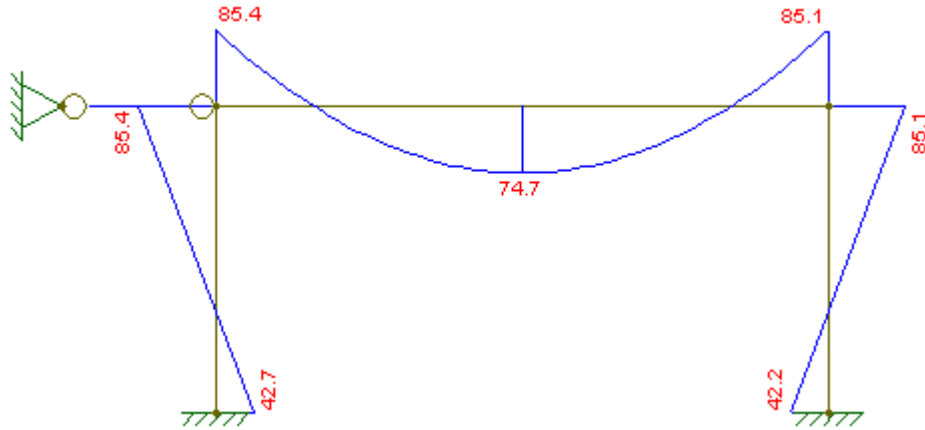


Figura 7.4: Diagrama do momento fletor para sobrecarga como ação variável base

Considerando o vento como ação variável base tem-se que

$$E_{fi,d} = G_k + 0,2 \cdot w_k + 0,3 \cdot q_k$$

Obtemos assim os seguintes diagramas de esforços

Esforço axial (KNm):

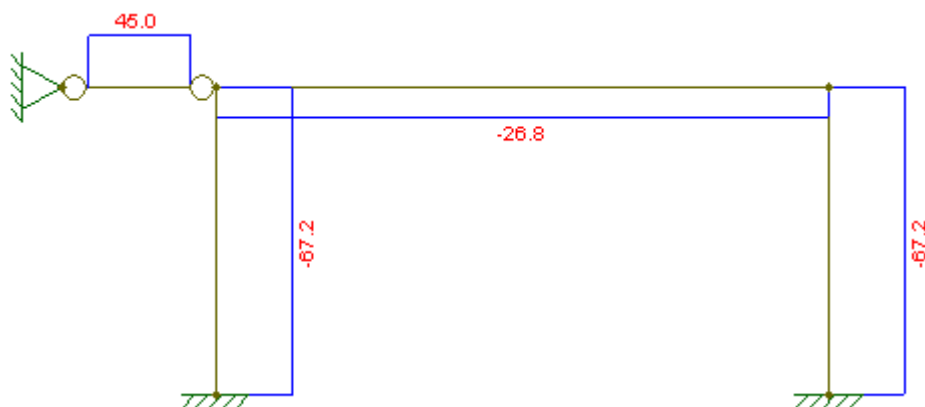


Figura 7.5: Diagrama do esforço axial para vento como ação variável base

Esforço transversal (KN):

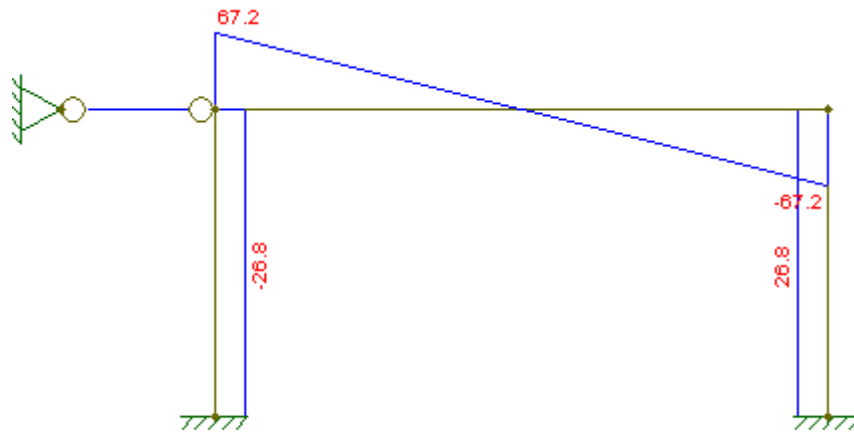


Figura 7.6: Diagrama do esforço transversal para vento como ação variável base

Momento fletor (KNm):

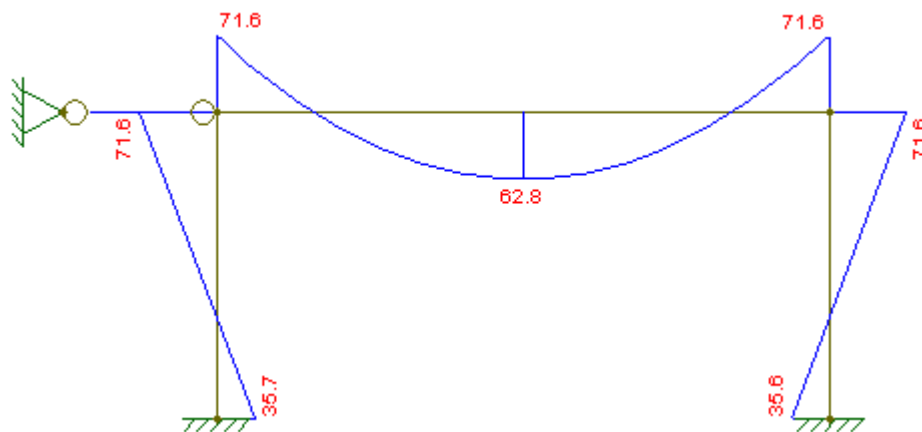


Figura 7.7: Diagrama do momento fletor para vento como ação variável base

7.1 Elemento de contraventamento (sujeito a tração)

7.1.1 No domínio da resistência estrutural

O contraventamento encontra-se com uma tensão axial em situação de incêndio de $N_{fi,d,t} = 45 \text{ KN}$. Sendo o contraventamento um HEB 120 o seu fator de massividade é

$$\frac{A_m}{V} = 203 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

Interpolando os valores da Tabela 4.1 para um fator de massividade de 203 m^{-1} e ao fim de 30 minutos obtém-se uma temperatura de $828 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Interpolando os valores do Quadro 2.1 para uma temperatura de $828 \text{ }^{\circ}\text{C}$ obtém-se uma tensão de cedência efectiva de $K_{y,\theta} = 0,096$

Então

$$N_{Rd} = N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M,0} = 3401 \cdot 0,235 / 1,0 = 799,2 \text{ KN}$$

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] = 0,096 \cdot 799,2 \cdot [1,0 / 1,0] = 76,7 \text{ KN}$$

$$N_{fi,\theta,Rd} \geq N_{fi,d,t}$$

Logo verifica a segurança.

7.1.2 No domínio temporal

O tempo de resistência ao fogo de um elemento traccionado $t_{fi,d}$, tem de ser superior ao tempo regulamentar de resistência ao fogo $t_{fi,requ}$

Esta temperatura é atingida quando $N_{fi,\theta,Rd} = N_{fi,d,t}$

A cedência do elemento ocorre quando

$$N_{fi,\theta,Rd} = A \cdot f_{y,\theta} = 3401 \cdot f_{y,\theta} = 45 \Rightarrow f_{y,\theta} = 13,23 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y = 13,23 / 235 = 0,0563$$

Interpolando os valores do Quadro 2.1 para uma tensão de cedência efectiva de $K_{y,\theta} = 0,0563$ obtém-se uma temperatura de $918 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Consultando a Tabela 4.1 verifica-se que para uma temperatura de $918 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e um fator de massividade 203 m^{-1} será necessário um intervalo de tempo superior a 45 minutos o que excede o tempo regulamentar exigido (30 minutos). Logo verifica a segurança.

7.1.3 Domínio da temperatura

$$R_{fi,d,0} = N_{Rd} = A \cdot f_y = 3401 \cdot 0,235 = 799,2 \text{ KN}$$

$$E_{fi,d} = 45 \text{ KN}$$

Grau de utilização

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0} = 45/799,2 = 0,0563$$

Temperatura crítica

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 915 \text{ }^\circ\text{C}$$

Interpolando os valores da Tabela 4.1 para um fator de massividade de 203 m^{-1} e ao fim de 30 minutos obtém-se uma temperatura de $828 \text{ }^\circ\text{C}$ que é inferior à temperatura crítica. Logo verifica a segurança.

7.2 Viga (sujeita a flexão composta com compressão)

Admite-se que a laje impede a encurvadura lateral da viga.

Comece-se por determinar a classe do perfil IPE 300 em situação de incêndio

$$c = 71,4 \text{ mm}$$

$$d = 248,6 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

Tratando-se de um aço do tipo S235

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y} = 0,85$$

A classe do banzo comprimido é

$$c/t_f = 71,4/10,7 = 6,67 < 9\varepsilon = 7,65 \Rightarrow \text{classe 1}$$

Por outro lado a classe da alma flectida é

$$d/t_w = 248,6/7,1 = 35,01 < 72\varepsilon = 61,2 \Rightarrow \text{classe 1}$$

Conclui-se assim que a viga IPE 300 em situação de incêndio é de Classe 1

As esbeltezas à temperatura ambiente valem:

- Segundo o eixo fraco: $\lambda_z = l_{fi}/i_z = 4000/33,5 = 119,4$
- Segundo o eixo forte: $\lambda_y = l_{fi}/i_y = 4000/124,6 = 32,1$

Assim, as esbeltezas adimensionais são iguais a:

- Segundo o eixo fraco: $\bar{\lambda}_z = \lambda_z/\lambda_1 = 119,4/93,9 = 1,272$
- Segundo o eixo forte: $\bar{\lambda}_y = \lambda_y/\lambda_1 = 32,1/93,9 = 0,342$

pelo que

$$\bar{\lambda}_{z,20^\circ\text{C}} = \bar{\lambda}_z [k_{y,20^\circ}/k_{E,20^\circ}]^{0,5} = \bar{\lambda}_z = 1,272$$

e

$$\bar{\lambda}_{y,20^\circ\text{C}} = \bar{\lambda}_y [k_{y,20^\circ}/k_{E,20^\circ}]^{0,5} = \bar{\lambda}_y = 0,342$$

Os fatores de redução para a encurvadura χ_{fi} à temperatura ambiente são:

- Segundo o eixo fraco:

$$\varphi_{z,20^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 1,272 + 1,272^2] = 1,722$$

e

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{1,722 + \sqrt{1,722^2 - 1,272^2}} = 0,347$$

- Segundo o eixo forte:

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

$$\varphi_{y,20^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 0,342 + 0,342^2] = 0,670$$

e

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{0,670 + \sqrt{0,670^2 - 0,342^2}} = 0,803$$

Considerando $M_{z,fi,Ed} = 0$, o grau de utilização é igual a:

$$\mu_0 = \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A f_y} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} f_y}$$

em que

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

com

$$\mu_y = (2\beta_{M,y} - 5)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} + 0,29 \leq 0,8$$

Através do Quadro 6.3 retira-se $\beta_{M,y} = 1,19$

pelo que

$$\mu_y = (2 \cdot 1,19 - 5) \cdot 0,342 + 0,44 \cdot 1,19 + 0,29 = -0,082$$

e

$$k_y = 1 - \frac{-0,082 \cdot 31,8 \times 10^3}{0,803 \cdot 5381 \cdot 235} = 1,003$$

Vindo o grau de utilização

$$\mu_0 = \frac{31,8 \times 10^3}{0,347 \cdot 5381 \cdot 235} + \frac{1,003 \cdot 85,4 \times 10^6}{628,4 \times 10^3 \cdot 235} = 0,652$$

A este valor corresponde a temperatura crítica de

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 539^{\circ}\text{C}$$

Contudo, esta não é de fato, a temperatura crítica, pois foi obtida com base em esbeltezas correspondentes à temperatura ambiente e não à temperatura crítica, assim, recorrendo a um processo iterativo, vem:

- Primeira iteração

Para $\theta_{a,cr} = 539^\circ\text{C}$ os fatores de redução de tensão de cedência e do módulo de Young valem

$$k_{y,539^\circ} = 0,6591$$

e

$$k_{E,539^\circ} = 0,4869$$

Vindo as esbeltezas adimensionais corrigidas

$$\bar{\lambda}_{z,539^\circ\text{C}} = 1,272 \cdot [0,6591/0,4869]^{0,5} = 1,480$$

e

$$\bar{\lambda}_{y,539^\circ\text{C}} = 0,342 \cdot [0,6591/0,4869]^{0,5} = 0,398$$

Os fatores de redução para a encurvadura χ_{fi} à temperatura de 539°C valem

- Segundo o eixo fraco:

$$\varphi_{z,539^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 1,480 + 1,480^2] = 2,076$$

e

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{2,076 + \sqrt{2,076^2 - 1,480^2}} = 0,283$$

- Segundo o eixo forte:

$$\varphi_{y,539^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 0,398 + 0,398^2] = 0,708$$

e

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{0,708 + \sqrt{0,708^2 - 0,398^2}} = 0,772$$

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

O valor de μ_y corrigido vale:

$$\mu_y = (2 \cdot 1,19 - 5) \cdot 0,398 + 0,44 \cdot 1,19 + 0,29 = -0,229$$

e

$$k_y = 1 - \frac{-0,229 \cdot 31,8 \times 10^3}{0,772 \cdot 5381 \cdot 0,6591 \cdot 235} = 1,011$$

Vindo o grau de utilização

$$\mu_0 = \frac{31,8 \times 10^3}{0,283 \cdot 5381 \cdot 235} + \frac{1,011 \cdot 85,4 \times 10^6}{628,4 \times 10^3 \cdot 235} = 0,674$$

A que corresponde a temperatura crítica de

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,674^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 533 \text{ °C}$$

- Segunda iteração

Para $\theta_{a,cr} = 533 \text{ °C}$, os fatores de redução de tensão de cedência e do módulo de Young valem

$$k_{y,533^\circ} = 0,6777$$

e

$$k_{E,533^\circ} = 0,5043$$

Vindo as esbeltezas adimensionais corrigidas

$$\bar{\lambda}_{z,533^\circ\text{C}} = 2,543 \cdot [0,6777/0,5043]^{0,5} = 1,475$$

e

$$\bar{\lambda}_{y,533^\circ\text{C}} = 0,648 \cdot [0,6777/0,5043]^{0,5} = 0,396$$

Os fatores de redução para a encurvadura χ_{fi} à temperatura de 533 °C valem

- Segundo o eixo fraco:

$$\varphi_{z,533^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 1,475 + 1,475^2] = 2,066$$

e

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{2,066 + \sqrt{2,066^2 - 1,475^2}} = 0,285$$

- Segundo o eixo forte:

$$\varphi_{y,533^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 0,396 + 0,396^2] = 0,707$$

e

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{0,707 + \sqrt{0,707^2 - 0,396^2}} = 0,773$$

O valor de μ_y corrigido vale:

$$\mu_y = (2 \cdot 1,19 - 5) \cdot 0,396 + 0,44 \cdot 1,19 + 0,29 = -0,225$$

e

$$k_y = 1 - \frac{-0,225 \cdot 31,8 \times 10^3}{0,773 \cdot 5381 \cdot 0,6777 \cdot 235} = 1,011$$

Vindo o grau de utilização

$$\mu_0 = \frac{31,8 \times 10^3}{0,285 \cdot 5381 \cdot 235} + \frac{1,011 \cdot 85,4 \times 10^6}{628,4 \times 10^3 \cdot 235} = 0,673$$

A que corresponde a temperatura crítica de

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,673^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 533^{\circ}\text{C}$$

Ao fim de duas iterações a temperatura converge para o valor de:

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

$$\theta_{a,cr} = 533 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

É agora possível avaliar a resistência ao fogo do elemento para os vários domínios de verificação.

O fator de massividade do perfil IPE 300 vale $A_m/V = 187 \text{ m}^{-1}$ e o fator de massividade calculado como se o perfil tivesse protecção em caixa vale $[A_m/V]_b = 139 \text{ m}^{-1}$, pelo que o fator k_{sh} vale

$$k_{sh} = 0,9[A_m/V]_b/[A_m/V] = 0,9 \cdot 139/187 = 0,669$$

E o fator de massividade modificado vem dado por

$$k_{sh}[A_m/V] = 0,669 \cdot 187 = 125 \text{ m}^{-1}$$

7.2.1 No domínio da temperatura

Interpolando os valores da Tabela 4.1, para um tempo de 30 minutos e um fator de massividade de 125 m^{-1} , obtém-se uma temperatura de $782 \text{ }^{\circ}\text{C}$

pelo que

$$\theta_d > \theta_{a,cr}$$

Logo, a viga não tem a resistência ao fogo exigida

7.2.2 No domínio temporal

Para esta verificação temos que calcular o tempo que o elemento demora a atingir a temperatura crítica de $533 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Interpolando os valores da Tabela 4.1 para um fator de massividade de 125 m^{-1} e para uma temperatura de $533 \text{ }^{\circ}\text{C}$ obtém-se que o tempo necessário para atingir a temperatura crítica é de

$$t_{fi,d} = 12,8 \text{ min}$$

Sabe-se que o tempo regulamentar de resistência ao fogo $t_{fi,requ} = 30 \text{ minutos}$

Como

$$t_{fi,d} < t_{fi,requ}$$

Conclui-se que o elemento não cumpre a exigência regulamentar de resistência ao fogo

7.2.3 No domínio da resistência estrutural

Para a viga verificar a resistência ao fogo, tem que se verificar a seguinte expressão:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

À temperatura de 782 °C, atingida ao fim de 30 *minutos*, correspondem por interpolação do Quadro 2.1 os fatores de redução de tensão de cedência e do módulo de Young de

$$k_{y,782^\circ} = 0,1316$$

e

$$k_{E,782^\circ} = 0,0972$$

As esbeltezas à temperatura ambiente valem:

- Segundo o eixo fraco: $\lambda_z = l_{fi}/i_z = 4000/33,5 = 119,4$
- Segundo o eixo forte: $\lambda_y = l_{fi}/i_y = 4000/124,6 = 32,1$

Vindo as esbeltezas adimensionais:

- Segundo o eixo fraco: $\bar{\lambda}_z = \lambda_z/\lambda_1 = 119,4/93,9 = 1,272$
- Segundo o eixo forte: $\bar{\lambda}_y = \lambda_y/\lambda_1 = 32,1/93,9 = 0,342$

pelo que

$$\bar{\lambda}_{z,782^\circ\text{C}} = 1,272 \cdot [0,1316/0,0972]^{0,5} = 1,480$$

e

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

$$\bar{\lambda}_{y,782^{\circ}\text{C}} = 0,342 \cdot [0,1316/0,0972]^{0,5} = 0,398$$

Os fatores de redução para a encurvadura χ_{fi} à temperatura de 782 °C

- Segundo o eixo fraco:

$$\varphi_{z,782^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 1,480 + 1,480^2] = 2,076$$

e

$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{2,076 + \sqrt{2,076^2 - 1,480^2}} = 0,283$$

- Segundo o eixo forte:

$$\varphi_{y,782^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} [1 + 0,65 \cdot 0,398 + 0,398^2] = 0,709$$

e

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{0,709 + \sqrt{0,709^2 - 0,398^2}} = 0,772$$

Através da figura () retira-se $\beta_{M,y} = 1,19$

pelo que

$$\mu_y = (2 \cdot 1,19 - 5) \cdot 0,398 + 0,44 \cdot 1,19 + 0,29 = -0,229$$

e

$$k_y = 1 - \frac{-0,229 \cdot 31,8 \times 10^3}{0,772 \cdot 5381 \cdot 0,1316 \cdot 235} = 1,057$$

então

$$\frac{31,8 \times 10^3}{0,283 \cdot 5381 \cdot 0,1316 \cdot 235} + \frac{1,057 \cdot 85,4 \times 10^6}{628,4 \times 10^3 \cdot 235 \cdot 0,1316} = 5,318 > 1$$

Logo o elemento não tem suficiente resistência ao fogo.

7.3 Pilares (Sujeitos à compressão)

Considera-se por simplificação, que os pilares encontram-se apenas sujeitos a compressão.

Comece-se por determinar a classe do perfil IPE 300 em situação de incêndio

$$c = 71,4 \text{ mm}$$

$$d = 248,6 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

Tratando-se de um aço do tipo S235

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y} = 0,85$$

A classe do banzo comprimido é

$$c/t_f = 71,4/10,7 = 6,67 < 9\varepsilon = 7,65 \Rightarrow \text{classe 1}$$

Por outro lado a classe da alma flectida é

$$d/t_w = 248,6/7,1 = 35,01 < 72\varepsilon = 61,2 \Rightarrow \text{classe 1}$$

Conclui-se assim que a viga IPE 300 em situação de incêndio é de Classe 1

O coeficiente de esbelteza adimensional modificado depende da temperatura, pelo que é necessário recorrer a um processo iterativo para determinação da temperatura crítica.

Começando por calculá-lo para 20 °C.

A esbelteza à temperatura ambiente vale:

$$\lambda = \frac{l_{fi}}{i} = \frac{0,7 \cdot 4000}{33,5} = 83,6$$

A esbelteza adimensional $\bar{\lambda}$ é dada por

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{83,6}{93,9} = 0,89$$

Logo

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} [k_{y,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5} = 0,89 \cdot [1,0/1,0]^{0,5} = 0,89$$

O fator de redução para a encurvadura deve ser determinado de acordo com:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = 0,508$$

Com

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] = 1,185$$

E

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} = 0,65 \cdot \sqrt{235/235} = 0,65$$

Valor de cálculo do esforço de compressão resistente no instante $t = 0$

$$N_{b,fi,0,Rd} = \chi_{fi} A f_y = 0,508 \cdot 5381 \cdot 0,235 = 642,5 \text{ KN}$$

Vindo o grau de utilização

$$\mu_0 = N_{b,fi,d}/N_{b,fi,0,Rd} = 80/642,5 = 0,125$$

A que corresponde a temperatura crítica de

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,125^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 796 \text{ °C}$$

O processo iterativo para determinação da temperatura crítica encontra-se indicado na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Processo iterativo para obtenção da temperatura crítica

θ_a	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$\bar{\lambda}_\theta$ $= \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$	φ_θ	χ_{fi}	$N_{b,fi,0,Rd}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
20	1.0	1.0	0.890	1.185	0.508	642.5	0.125	796
796	0.115	0.092	0.996	1.320	0.457	578.4	0.138	780
780	0.134	0.098	1.041	1.380	0.438	553.2	0.145	774
774	0.141	0.100	1.055	1.400	0.431	545.1	0.147	772
772	0.144	0.101	1.060	1.407	0.429	542.5	0.147	771
771	0.145	0.102	1.062	1.410	0.428	541.2	0.148	770
770	0.146	0.102	1.065	1.413	0.427	540.0	0.148	770

Assim, após convergência do processo iterativo obteve-se a temperatura crítica de

$$\theta_{a,cr} = 770 \text{ °C}$$

É agora possível avaliar a resistência ao fogo do elemento para os vários domínios de verificação.

O fator de massividade do perfil IPE 300 vale $A_m/V = 216 \text{ m}^{-1}$ e o fator de massividade calculado como se o perfil tivesse protecção em caixa vale $[A_m/V]_b = 167 \text{ m}^{-1}$, pelo que o fator k_{sh} vale

$$k_{sh} = 0,9 \cdot [A_m/V]_b / [A_m/V] = 0,9 \cdot 167 / 216 = 0,696$$

E o fator de massividade modificado vem dado por

$$k_{sh}[A_m/V] = 0,696 \cdot 216 = 150 \text{ m}^{-1}$$

7.3.1 No domínio da temperatura

Interpolando os valores da Tabela 4.1, para um tempo de 30 minutos e um fator de massividade de 150 m^{-1} , obtém-se uma temperatura de $798 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Pelo que

$$\theta_d > \theta_{a,cr}$$

Logo, os pilares não tem a resistência ao fogo exigida

7.3.2 No domínio temporal

Para esta verificação há que calcular o tempo que o elemento demora a atingir a temperatura crítica de $770 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Interpolando os valores da Tabela 4.1 para um fator de massividade de 150 m^{-1} e para uma temperatura de $770 \text{ }^{\circ}\text{C}$, obtém-se que o tempo necessário para atingir a temperatura crítica é de

$$t_{fi,d} = 26,8 \text{ minutos}$$

Sabe-se que o tempo regulamentar de resistência ao fogo $t_{fi,requ} = 30 \text{ minutos}$

Como

$$t_{fi,d} < t_{fi,requ}$$

Conclui-se que o elemento não cumpre a exigência regulamentar de resistência ao fogo

7.3.3 No domínio da resistência estrutural

Para se verificar a resistência dos pilares ao fogo, é necessário calcular o valor do esforço de compressão resistente ao fim de 30 *minutos*

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}$$

À temperatura de $798 \text{ }^{\circ}\text{C}$, atingida ao fim de 30 *minutos*, correspondem por interpolação do Quadro 2.1 aos fatores de redução de tensão de cedência e do módulo de Young de

$$k_{y,798^\circ} = 0,1124$$

e

$$k_{E,798^\circ} = 0,0908$$

A esbelteza à temperatura ambiente vale:

$$\lambda = \frac{l_{fi}}{i} = \frac{0,7 \cdot 4000}{33,5} = 83,6$$

A esbelteza adimensional $\bar{\lambda}$ é dada por

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{83,6}{93,9} = 0,89$$

Logo

$$\bar{\lambda}_{798^\circ\text{C}} = 0,89 \cdot [0,1124/0,0908]^{0,5} = 0,99$$

O fator de redução para a encurvadura deve ser determinado de acordo com:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = 0,460$$

Com

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] = 1,312$$

e

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} = 0,65 \cdot \sqrt{235/235} = 0,65$$

Valor de cálculo do esforço de compressão resistente no instante $t = 30 \text{ minutos}$, ou seja, à temperatura de 798°C

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,460 \cdot 5381 \cdot 0,1124 \cdot 0,235 = 65,4 \text{ KN}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} < N_{b,fi,d}$$

Logo, o pilar não tem suficiente resistência ao fogo.

7.4 Utilização de material de proteção

Admita-se agora que os pilares devem ter resistência ao fogo de 100 minutos e que, para tal, se utilizam placas de gesso pretende-se determinar a espessura dessas placas, considerando uma proteção em caixão.

Para esta situação, o elemento tem um fator de massividade de 167 m^{-1}

Para a situação não protegida (7.3), obteve-se uma temperatura crítica de $\theta_{a,cr} = 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$

A tabela 5.1 fornece para o gesso:

$$\lambda_p = 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$c_p = 1700 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$$

$$\rho_p = 800 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$p = 20\% \text{ (valor de cálculo do teor em humidade)}$$

Consultando a Tabela 4.2 para uma temperatura crítica de $\theta_{a,cr} = 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e para um tempo regulamentar de 100 *minutos* obtém-se

$$\frac{A_p \lambda_p}{V d_p} \leq 1963 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$$

Daqui tira-se que

$$d_p \geq 0,017 \text{ m} = 17 \text{ mm}$$

Esta espessura pode ser corrigida se se tiver em conta a capacidade calorífica da secção. Para tal, há que calcular ϕ de acordo com a expressão

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

E obter uma nova espessura d_p através da expressão corrigida

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/2} \leq 1963 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$$

Recorrendo a um processo iterativo

Tabela 7.2: Processo iterativo para obtenção da temperatura crítica

d_p	$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$	$d_p \geq \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{1963} \cdot \frac{1}{1 + \phi/2}$
0.017	0.4913	0.011
0.011	0.3297	0.013
0.013	0.3613	0.012
0.012	0.3612	0.012

Assim, tendo em conta a capacidade calorífica da secção deve-se usar uma espessura de 12 milímetros em vez de 17 milímetros

Deve-se ter também em conta o tempo de atraso devido ao teor de humidade

$$t_v = \frac{p \rho_p d_p^2}{5 \lambda_p} = 2 \text{ minutos}$$

Logo para placas de gesso com uma espessura de 12 milímetros obtém-se um tempo de resistência ao fogo de $100 + 2 = 102 \text{ minutos}$

7.5 Esforços atuantes

Em seguida apresentam-se os esforços obtidos pela combinação acidental e pelo método simplificado referido em 3.1.2. Para este método, considera-se duas hipóteses: uma onde se determina η_{fi} e outra onde se assume que η_{fi} é igual a 0,6.

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

7.5.1 Combinação acidental

Tabela 7.3: Esforços obtidos pela combinação acidental (sobrecarga dominante)

Sobrecarga	N_{\max} [KN]	V_{\max} [KN]	M_{\max} [KN.m]	$M^{1/2}$ vao
P1	80	32	85.4	
P2	80	31.8	85.4	
Viga	31.8	80	85.4	74.7

Tabela 7.4: Esforços obtidos pela combinação acidental (vento dominante)

Vento	N_{\max} [KN]	V_{\max} [KN]	M_{\max} [KN.m]	$M^{1/2}$ vao
P1	67.2	26.8	71.6	
P2	67.2	26.8	71.6	
Viga	26.8	67.2	71.6	62.8

7.5.2 Método simplificado (Hipótese 1)

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

Da combinação fundamental obtém-se:

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Considerando a sobrecarga como ação variável base tem-se que

$$E_d = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_k$$

$$\eta_{fi} = \frac{12 + 0,5 \cdot 16}{1,35 \cdot 12 + 1,5 \cdot 16} = 0,497$$

Tabela 7.5: Esforços obtidos pelo método simplificado (sobrecarga dominante)

Sobrecarga	N _{máx} [KN]	V _{máx} [KN]	M _{máx} [KN.m]	M ^{1/2} <i>vao</i>
P1	79.9	32	85.3	
P2	79.9	31.8	85.1	
Viga	31.8	79.9	85.3	74.7

Considerando o vento como ação variável base tem-se que

$$E_d = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot W_k + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_k$$

$$\eta_{fi} = \frac{12 + 0,2 \cdot 11,25}{1,35 \cdot 12 + 1,5 \cdot 11,25} = 0,431$$

Tabela 7.6: Esforços obtidos pelo método simplificado (vento dominante)

Vento	N _{máx} [KN]	V _{máx} [KN]	M _{máx} [KN.m]	M ^{1/2} <i>vao</i>
P1	56.9	22.7	60.7	
P2	56.9	22.7	60.6	
Viga	22.7	56.9	60.7	53.1

7.5.3 Método simplificado (Hipótese 2)

Segundo o Eurocódigo 3 parte 1-2, o fator de redução η_{fi} pode ser tomado igual a 0,6 para edifícios correntes das categorias A e B

Considerando a sobrecarga como ação variável base tem-se que

Tabela 7.7: Esforços obtidos pelo valor recomendado (sobrecarga dominante)

Sobrecarga	N _{máx} [KN]	V _{máx} [KN]	M _{máx} [KN.m]	M ^{1/2} <i>vao</i>
P1	96.5	38.4	103	
P2	96.5	38.4	102.7	
Viga	38.4	96.5	103	90.1

Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo

Exemplo prático

Considerando o vento como ação variável base tem-se que

Tabela 7.8: Esforços obtidos pelo valor recomendado (vento dominante)

Vento	$N_{m\acute{a}x}$ [KN]	$V_{m\acute{a}x}$ [KN]	$M_{m\acute{a}x}$ [KN.m]	$M^{1/2}$ vao
P1	79.2	31.6	84.5	
P2	79.2	31.6	84.5	
Viga	31.6	79.2	84.5	74

Capítulo 8

Conclusões

Este trabalho abordou, de uma forma geral, o comportamento do aço quando sujeito ao fogo. Neste contexto, foi dado um maior destaque ao dimensionamento de estruturas de aço ao fogo dando especial atenção aos métodos simplificados preconizados no Eurocódigo 3, parte 1.2.

Verificou-se que as propriedades térmicas e mecânicas do aço variam com a evolução da temperatura. Esta evolução de temperatura pode ser obtida através de modelos de cálculo avançados ou através de métodos simplificados de cálculo. Os métodos simplificados de cálculo consideram uma temperatura uniforme na secção e dependem muito de um fator que tem em conta a espessura dos elementos, fator de massividade ou fator de forma, fator este que mede a rapidez com que um elemento aquece.

Sendo a representação de modelos de incêndios reais muito difícil devido a todas as variáveis envolvidas, é necessário utilizar modelos simplificados mas adequados com a realidade, tais como as curvas nominais ou curvas paramétricas, sendo as curvas nominais definidas por equações simples e as curvas paramétricas definidas por equações que dependem de vários parâmetros físicos.

Um incêndio, sendo considerado uma ação de acidente, implica a utilização da combinação accidental presente no EC0. No entanto, se o projeto original de estabilidade de uma estrutura tiver sido feito sem ter em conta a resistência ao fogo pode-se utilizar um coeficiente de redução (3.4) sobre os esforços obtidos de forma a simplificar os cálculos.

A utilização de materiais de proteção permite obter tempos de resistência ao fogo longos e de uma forma mais económica quando comparada com o aumento da secção do elemento.

Os métodos de cálculo simplificados são fáceis de utilizar e geralmente apresentam valores conservativos.

No exemplo prático presente nesta dissertação, verificou-se que os valores obtidos pelo método simplificado e usando o valor de η_{fi} valor recomendado pelo Eurocódigo 3, parte 1.2 são superiores aos obtidos pela combinação accidental. Tal resultado é lógico, pois para métodos simples são de esperar valores mais conservativos. Quando se utiliza o método simplificado com o fator η_{fi} determinado a partir dos valores das ações, nota-se que para a sobrecarga como ação variável de base os valores dão praticamente idênticos aos da combinação accidental, mas quando se considera o vento como ação variável de base os valores obtidos pelo método simplificado são inferiores, não sendo conservativos como seria de esperar.

Bibliografia

- [1] Cajot, Louis-Guy., *Cost-effective fire performance*. s.l. : February, 19th 2008.
- [2] CEN, ENV 1991-1-1, *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General Actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. s.l. : October 1994.
- [3] CEN, ENV 1991-1-2, *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General Actions - Actions on structures exposed to fire*. s.l. : November 2002.
- [4] CEN, prEN 1990, *Eurocode - Basis of structural design* . s.l. : final draft, July 2001.
- [5] CEN, prEN 1993-1-1, *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-1. General rules and rules for buildings*. s.l. : Stage 34 draft, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, February 2003.
- [6] CEN, prEN 1993-1-2, *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2. General rules - Structural fire design*. s.l. : Stage 34 draft, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, April 2003.
- [7] ECCS - Technical Committee 3 - *Fire Safety of Steel Structures - Calculation Of the Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies Exposed to the Standard Fire*. s.l. : Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1983.

- [8] ECCS - Technical Committee 3 - Fire Safety of Steel Structures - Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures. s.l. : First Edition, 1985.
- [9] Fonseca, Elza Maria Morais., *Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânico de Perfis Metálicos Sujeitos à Acção do Fogo* : Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [10] Franssen, Jean-Mark, Kodur, Venkatesh e Zaharia, Raul., *Designing Steel Structures for Fire Safety*. s.l. : Taylor & Francis Group, London, UK, 2009 .
- [11] Mesquita, L.M.R. , *Instabilidade termo-mecânica de vigas submetidas a temperaturas elevadas. Estudo numérico e experimental*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004
- [12] Pannoni, Fábio Domingos., *Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio*. s.l. : Coletânea do uso do aço, 3ª Edição Volume 2, 2004.
- [13] Piloto, Paulo Alexandre Gonçalves., *Análise experimental e numérica do comportamento das estruturas metálicas sujeitas ao fogo*. s.l. : Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [14] Ramos, Rui António Rodrigues., *Nova Filosofia de Cálculo de Estruturas de Aço - Eurocódigo 3* : Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993.
- [15] Vila Real, Paulo M. M., *Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural*. s.l. : Orion, 2003.
- [16] <http://www.vermiculite.com.my/portfolio/fireproofing-spray/>
- [17] http://publicecodes.cyberregs.com/icod/ibc/2009/icod_ibc_2009_7_par431.htm
- [18] <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>